

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

**16+
ISSN 2071-6168**

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 3

**Тула
Издательство ТулГУ
2016**

Известия Тульского государственного университета. Технические науки.
Вып. 3. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 273 с.

Рассматриваются научно-технические проблемы технологии и оборудования обработки металлов давлением, военно-специальных наук, электротехники, приборостроения, метрологии и информационно-измерительных приборов и систем, информатики, вычислительной техники, обработки и защиты информации, машиностроения и машиноведения.

Материалы предназначены для научных работников, преподавателей вузов, студентов и аспирантов, специализирующихся в проблематике технических наук.

Редакционный совет

М.В. ГРЯЗЕВ – председатель, **В.Д. КУХАРЬ** – зам. председателя, **В.В. ПРЕЙС** – главный редактор, **А.А. МАЛИКОВ** – отв. секретарь, **И.А. БАТАНИНА**, **О.И. БОРИСКИН**, **А.Ю. ГОЛОВИН**, **В.Н. ЕГОРОВ**, **В.И. ИВАНОВ**, **Н.М. КАЧУРИН**, **В.М. ПЕТРОВИЧЕВ**

Редакционная коллегия

О.И. Борискин (отв. редактор), С.Н. Ларин (зам. отв. редактора), Б.С. Яковлев (отв. секретарь), И.Л. Волчкевич, Р.А. Ковалев, М.Г. Кристаль, А.Д. Маляренко (Республика Беларусь), А.А. Сычугов, Б.С. Баласанян (Республика Армения), А.Н. Чуков

Подписной индекс 27851
по Объединённому каталогу «Пресса России»

Сборник зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
ПИ № ФС77-61104 от 19 марта 2015 г.

«Известия ТулГУ» входят в Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора наук

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.983; 539.374

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ СТРИНГЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ КАНАЛАМИ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕОРИЯМ ПОЛЗУЧЕСТИ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

С.Н. Ларин, В.И. Платонов, Е.П. Куприн, С.С. Яковлев (мл.)

Представлены выражения для определения накопленной повреждаемости для различных групп материалов, подчиняющихся энергетической, кинетической теориям ползучести и повреждаемости, в условиях вязкопластического течения материала, что подразумевает использование в качестве основы как энергетической, так и кинетической теорий кратковременной ползучести и разрушения

Ключевые слова: формоизменение, мембрана, деформации, повреждаемость, цилиндрические каналы.

Медленное деформирование в условиях вязкого или вязкопластического течения является кратковременной ползучестью. Пренебрегаем упругими составляющими деформации [1 – 3]. Считаем, что если величина эквивалентного напряжения σ_e меньше некоторой величины σ_{e_0} , например, соответствующей эквивалентной остаточной степени деформации $\varepsilon_{e_0} = 0,2\%$ при эквивалентной скорости деформации $\xi_{e_0} = 0,02$ 1/с, то процесс формоизменения будет протекать в условиях вязкого течения материала и с учетом повреждаемости уравнения состояния, описывающие поведение материала, подчиняющегося энергетической теории ползучести и повреждаемости, записываются как

$$\xi_e^c = \frac{B(\sigma_e/\sigma_{e_0})^n}{(1-\omega_A^c)^m}; \quad \dot{\omega}_A^c = \frac{\sigma_e \xi_e^c}{A_{np}^c}, \quad (1)$$

а применительно к группе материалов, подчиняющихся кинетическим уравнениям ползучести и повреждаемости, так:

$$\xi_e^c = B \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{e0}} \right)^n \frac{1}{(1 - \omega_e^c)^m}; \quad \dot{\omega}_e^c = \frac{\xi_e^c}{\varepsilon_{e np}^c}. \quad (2)$$

Уравнения состояния при вязкопластическом течении материала ($\sigma_e > \sigma_{e0}$) имеют вид

$$\sigma_e = \sigma_{e0} \left(\frac{\varepsilon_e^{cp}}{\varepsilon_{e0}^{cp}} \right)^d \left(\frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e0}^{cp}} \right)^k (1 - \omega_A^{cp})^r; \quad \dot{\omega}_A^{cp} = \frac{\sigma_e \xi_e^{cp}}{A_{np}^{cp}}, \quad (3)$$

если поведение материала описывается энергетической теорией нелинейного вязкопластического течения и разрушения, и

$$\sigma_e = \sigma_{e0} \left(\frac{\varepsilon_e^{cp}}{\varepsilon_{e0}^{cp}} \right)^d \left(\frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e0}^{cp}} \right)^k (1 - \omega_e^{cp})^r; \quad \dot{\omega}_e^{cp} = \frac{\xi_e^{cp}}{\varepsilon_{e np}^{cp}}, \quad (4)$$

если поведение материала описывается кинетической теорией нелинейного ползуче-пластического течения и разрушения.

Далее описывается формоизменение оболочки из материала, подчиняющегося энергетической теории ползучести и повреждаемости, свойства которого в предположении, что $\sigma_e < \sigma_{e0}$, характеризуются уравнениями (1) (рисунок).

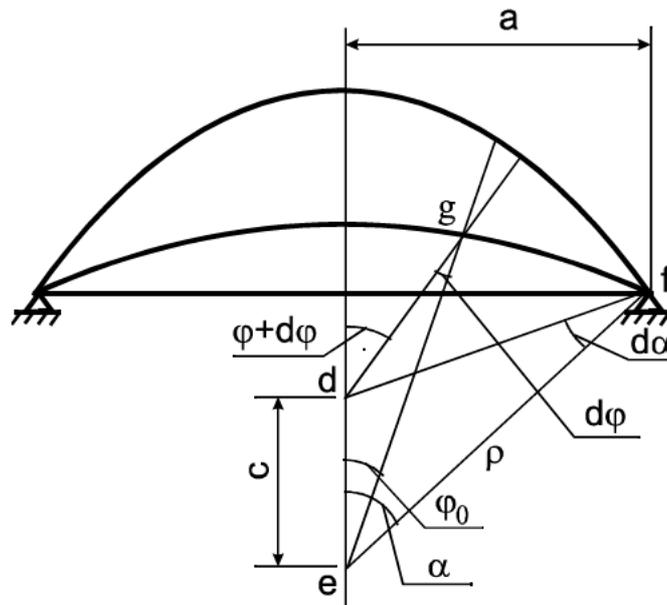


Схема к расчету деформированного состояния срединной поверхности оболочки

Подставив в первое из уравнений состояния материала (1) входящие величины σ_e , ξ_e , получим

$$p^n dt = \frac{C_1 \sigma_{e0}^n (1 - \omega_A^c)^m h^n (\sin \alpha)^n \left(\frac{\sin \varphi}{\varphi \sin \alpha} - ctg \alpha \right) d\alpha}{BD_1^n a^n}. \quad (5)$$

С учётом второго соотношения (2) повреждаемость

$$\dot{\omega}_A^c = \frac{D_1 C_1 p a}{\sin \alpha h A_{np}^c} \left(\frac{\sin \varphi}{\varphi \sin \alpha} - ctg \alpha \right) \dot{\alpha}. \quad (6)$$

Так как давление p равномерно распределено по поверхности оболочки, для определения его величины во времени достаточно рассмотреть случай, когда $\varphi = 0$. Кроме того, именно в этом направлении идет более интенсивное утонение толщины оболочки и накопление повреждаемости. При $\varphi \rightarrow 0$ уравнения (5) и (6) преобразуются как

$$p^n dt = \frac{C_1 \sigma_{e0}^n (1 - \omega_A^c)^m h^n (\sin \alpha)^n \left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) d\alpha}{BD_1^n a^n}, \quad (7)$$

$$d\omega_A^c = \frac{D_1 C_1 p a}{\sin \alpha h A_{np}^c} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) d\alpha. \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) можно записать в следующем виде:

$$p(t) = A \Phi(t) (1 - \omega_A^c)^{m/n}, \quad (9)$$

где $A = \frac{C_1^{1/n} \sigma_{e0} h_0 2^{\frac{n+1}{n}} \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{n+2}{n}} f^{1/n}}{B^{1/n} D_1 a}$; $\Phi(t) = t^{\frac{(n+2)f-1}{n}} / \left(1 + \frac{b^2}{a^2} t^{2f} \right)^{\frac{2n+1}{n}}$;

$$d\omega_A^c = \frac{D_1 C_1 p b f \left(1 + \frac{b^2}{a^2} t^{2f} \right) t^{f-1} dt}{h_0 A_{cp}^c}. \quad (10)$$

Система уравнений (9) и (10) решается совместно методом итераций. Решение этой системы при известном перемещении вершины купола от времени позволяет найти давление $p(t)$, обеспечивающее заданное деформирование, и определить предельную высоту купола при деформировании оболочки, для чего нужно принять накопленную повреждаемость $\omega_A^c = 1$.

Как и в предыдущем случае, если формоизменение оболочки определяется давлением p , необходимо воспользоваться системой уравнений (7) и (8), куда нужно подставить $h = h_0 \cos^2 \frac{\alpha}{2}$. Решение этой системы осуществляется в общем случае так же, как было указано раньше. Рассмотрим вариант, когда $p = const$. Интегрируя уравнение (8) при начальных условиях $t = 0, \omega_A^c = 0, \alpha = 0$, найдем

$$\omega_A^c = \frac{D_1 C_1 p a}{h_0 A_{np}^c} \int_0^{\alpha} \frac{\left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) d\alpha}{\sin \alpha \cos^2 \frac{\alpha}{2}}, \quad (11)$$

откуда следует

$$\omega_A^c = \frac{D_1 C_1 p a}{h_0 A_{np}^c} \frac{1}{3} \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\cos^3 \frac{\alpha}{2}} + 2tg \frac{\alpha}{2} \right). \quad (12)$$

Из выражения (12) в момент разрушения определяется угол раствора дуги α_* , принимающего при $\omega_A^c = 1$ вид

$$tg^3 \frac{\alpha_*}{2} + 3tg \frac{\alpha_*}{2} = \frac{3A_{np}^c h_0}{D_1 C_1 p a}. \quad (13)$$

При постоянном давлении уравнение (7) определяется следующим образом:

$$p^n dt = A_1 (1 - \omega_A^c)^m (\sin \alpha)^n \left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) \cos^{2n} \frac{\alpha}{2} d\alpha, \quad (14)$$

где

$$A_1 = \frac{C_1 \sigma_{e0}^n h_0^n}{B D_1^n a^n}.$$

Безразмерное время разрушения $\bar{t}_* = p^n \frac{1}{A_1} t_*$ можно записать как

$$\bar{t}_* = \int_0^{\alpha_*} \left(1 - \omega_A^c \right)^m (\sin \alpha)^n \left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) \cos^{2n} \frac{\alpha}{2} d\alpha. \quad (15)$$

Рассмотрим случай, когда $\xi_e = \xi_{e1} = const$:

$$p = \left(\frac{A_1}{C_1} \right)^{1/n} \left(1 - \omega_A^c \right)^{\frac{m}{n}} \sin \alpha \cos^2 \frac{\alpha}{2} (\xi_{e1})^{1/n}. \quad (16)$$

Путем подстановки первого уравнения состояния (1) во второе вычисляется накопление повреждаемости

$$\dot{\omega}_A^c = \frac{(1 - \omega_A^c)^{m/n} \sigma_{e0} (\xi_{e1})^{\frac{n+1}{n}}}{B^{1/n} A_{np}^c}. \quad (17)$$

Проинтегрируем это уравнение с начальными условиями $t = 0; \omega_A^c = 0$:

$$\omega_A^c = 1 - \left[1 + \frac{n-m}{n} \frac{(\xi_{e1})^{\frac{n+1}{n}} \sigma_{e0} t}{A_{cp} B^{1/n}} \right]^{\frac{n}{m-n}}. \quad (18)$$

Это выражение определяет $\omega_A^c = \omega_A^c(t)$. Изменение угла α в зависимости от времени при начальных условиях $t = 0, \alpha = 0$:

$$\xi_{e1} = const = C_1 \left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) \frac{d\alpha}{dt}; \quad (19)$$

$$\xi_{e1} t = C_1 \ln \frac{1}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}};$$

$$\alpha = 2 \arccos e^{-\frac{\xi_{c1} t}{2C_1}}. \quad (20)$$

Определив $\omega_A^c(t)$ из выражения (17) и $\alpha(t)$, также подставив их в выражение (16), получим значение давления $p(t)$, обеспечивающее деформирование при $\xi_{e1} = const$.

Рассмотрим формоизменение оболочки из материала, подчиняющегося кинетической теории ползучести и повреждаемости (2).

Накопление повреждаемости ω_e^c можно вычислить, подставив выражение σ_e из первого уравнения состояния (2) во второе. В результате получим

$$\dot{\omega}_e^c = \frac{k}{B} \xi_e^c = \frac{k}{B} C_1 \left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) \dot{\alpha}, \quad (21)$$

которое справедливо при $\varphi = 0$.

Интегрируя это уравнение при начальных данных $t = 0, \omega_e^c = 0, \alpha = 0$, определим

$$\omega_e^c = \frac{k}{B} C_1 \ln \frac{1}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}. \quad (22)$$

При $\omega_e^c = 1$ получим из уравнения (22) угол α_* в момент разрушения:

$$\alpha_* = 2 \arccos \left(e^{-\frac{B}{2kC_1}} \right). \quad (23)$$

Давление $p(t)$ может быть определено с использованием выражений (7) с заменой ω_A^c на ω_e^c и (22).

Рассмотрим случай, когда $\xi_e = \xi_{e1}$. При этом интегрирование уравнения (21) с учетом начальных условий $t = 0, \omega_e^c = 0$ записывается в виде

$$\omega_e^c = \frac{k}{B} \xi_{e1}^c t. \quad (24)$$

Определим значение ω_e^c по формуле (24), подставим в выражение (7), получим зависимость деформирующего давления p от величины накопленных микроповреждений $\omega_e^c(t)$. Если, кроме этого, принять во внимание, что

$$\xi_{e1} t = C_1 \ln \frac{1}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}, \quad (25)$$

т.е.

$$\alpha = 2 \arccos e^{-\frac{\xi_{e1} t}{2C_1}}, \quad (26)$$

то выражение (7) даст зависимость давления от времени, обеспечивающее условие деформирования, при котором $\xi_e^c = \xi_{e1}^c = const$.

Далее рассматривается случай, когда $p = const$. Угол α_* в момент разрушения будет определяться по формуле (23), а величина накопленной повреждаемости ω_e^c – по выражению (22). Безразмерное время разрушения определяется по формуле (15) с заменой в ней ω_A^c на ω_e^c и использованием выражения (22).

Пусть формоизменение задается перемещением вершины купола в зависимости от времени. В этом случае первое уравнение состояния системы (2) может быть преобразовано к виду (9) при $\varphi = 0$.

Уравнение, характеризующее накопленную повреждаемость, будет иметь вид

$$\omega_e^c = \frac{k}{B} C_1 \ln \frac{1}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}} = \frac{k}{B} C_1 \ln \left(1 + \frac{b^2}{a^2} t^{2f} \right). \quad (27)$$

Использование выражения (27) в соотношении (9) позволяет вычислить деформирующее давление как функцию времени. Если направление длинных сторон вырезанной заготовки совпадает с осью анизотропии y , то $\xi_y = 0$, $\sigma_y = R_y \sigma_x / (1 + R_y)$, где $\sigma_x = \sigma_\varphi = \frac{p\rho}{h}$, причем $\xi_z = -\xi_\varphi$ по условию несжимаемости.

Эквивалентное напряжение в этом случае

$$\sigma_e = D_2 \sigma_\varphi = D_2 \frac{p\rho}{h}, \quad (28)$$

где

$$D_2 = \frac{1}{1 + R_y} \sqrt{\frac{3R_y(R_x + (1 + R_y)^2 + R_y R_x)}{2(R_x + R_y R_x + 1)}},$$

а эквивалентная скорость деформации

$$\xi_e = C_2 \xi_\varphi = C_2 \left(\frac{\sin \varphi}{\varphi \sin \alpha} - \operatorname{ctg} \alpha \right) \dot{\alpha}, \quad (29)$$

где

$$C_2 = \frac{\sqrt{2(R_x + R_x R_y + R_y)} [R_x^3 + R_x^3 R_y + R_x^2 (1 + R_y)^2]^{1/2}}{\sqrt{3} R_x R_y^{1/2} (R_x + R_y + 1)}.$$

Заметим, что $C_1 D_1 = C_2 D_2 = 1$.

Рассмотренные выше выражения могут быть использованы и во втором варианте вырезки заготовок. Для этого нужно в них заменить C_1 и D_1 на C_2 и D_2 .

В случае, когда $\sigma_e > \sigma_{e0}$, процесс формоизменения реализуется в условиях вязкопластического течения материала, и поведение материала может описываться уравнением состояния (3) по энергетической теории или выражением (4) по кинетической теории кратковременной ползучести и разрушения.

Пусть формоизменение оболочки определяется давлением $p(t)$. Подставив в первое из уравнений состояния материала (3) входящие вели-

чины σ_e , ξ_e^{cp} и $\varepsilon_e^{cp} = \int_0^t \xi_e^{cp} dt$ при $\varphi = 0$, получим

$$p^{1/k} dt = \frac{\sigma_e^{1/k} \left[C_1 \ln \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha} \right) \right]^{d/k} (\sin \alpha)^{1/k} \left(\cos \frac{\alpha}{2} \right)^{2/k} h_0^{1/k}}{(\varepsilon_{e0})^{d/k} \xi_{e0} D_1^{1/k} a^{1/k}} \times \\ \times \left(1 - \omega_A^{cp} \right)^{r/k} C_1 \left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) d\alpha. \quad (30)$$

Из второго соотношения (4) может быть вычислена величина повреждаемости

$$\frac{d\omega_A^{cp}}{dt} = \frac{C_1 D_1 a p \left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) d\alpha}{A_{np}^{cp} \sin \alpha h_0 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} = \frac{C_1 D_1 a p d\alpha}{2 A_{np}^{cp} h_0 \cos^4 \frac{\alpha}{2}}. \quad (31)$$

Путем решения системы уравнений (30) и (31) определяются величины p и ω_A^{cp} . Разрушение оболочки происходит в момент времени, когда $\omega_A^{cp} = 1$.

Рассмотрим случай, когда скорость деформации постоянна: $\xi_e^{cp} = \xi_{e1}^{cp}$. В этом случае, если учесть, что $\varphi = 0$, из уравнения (30) получим соотношение для нахождения давления p , которое запишется следующим образом:

$$p = \frac{\sigma_{e0} \left[C_1 \ln \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha} \right) \right]^d \sin \alpha \cos^2 \frac{\alpha}{2} h_0 \left(1 - \omega_A^{cp} \right)^r}{(\varepsilon_{e0})^d D_1 a} \left(\frac{\xi_{e1}}{\xi_{e0}} \right)^k. \quad (32)$$

В этом случае повреждаемость ω_A^{cp} будет определяться как

$$\omega_A^{cp} = \frac{C_1 D_1 a}{2 A_{np}^{cp} h_0} \int_0^{\alpha} \frac{p d\alpha}{\cos^4 \frac{\alpha}{2}}. \quad (33)$$

Система выражений (32) и (33) решается методом итераций и определяется так $p = p(\alpha)$ и $\omega_A^{cp}(\alpha)$. Зависимость α от времени находится из условия

$$\xi_{e1} t = C_1 \int \left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) d\alpha = C_1 \ln \frac{1}{\cos^2 (\alpha/2)}, \quad (34)$$

т.е.

$$\alpha = 2 \arccos e^{-\frac{\xi_{e1} t}{2 C_1}}. \quad (35)$$

Предположим теперь, что $p = const$, поэтому повреждаемость будет находиться согласно второму соотношению (3), на основании которого имеем

$$\omega_A^{cp} = \frac{C_1 D_1 a p}{2 A_{np}^{cp} h_0} \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{\cos^4 \frac{\alpha}{2}}. \quad (36)$$

Принимается, что $A_{np}^{cp} \left(\frac{\sigma^{cp}}{\sigma_e}, \frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e0}} \right) = const$, $\left(\frac{\sigma^{cp}}{\sigma_e} \right) = const$, $\xi_e^{cp} = \xi_{e \min}^{cp} = \xi_{e0}^{cp}$.

Окончательно получим следующее уравнение:

$$\omega_A^{cp} = \frac{1}{3} \frac{C_1 D_1 p a}{h_0 A_{np}^{cp}} \left(tg^3 \frac{\alpha}{2} + 3 tg \frac{\alpha}{2} \right). \quad (37)$$

Угол раствора дуги средней линии в момент разрушения α_* определяется из уравнения (37) при $\omega_A^{cp} = 1$:

$$tg^3 \frac{\alpha_*}{2} + 3 tg \frac{\alpha_*}{2} = \frac{3 A_{np}^{cp} h_0}{C_1 D_1 p a}. \quad (38)$$

Из соотношения (30) при постоянном давлении безразмерное время разрушения будет определяться выражением

$$\bar{t}_* = \int_0^{\alpha_*} \left(1 - \omega_A^{cp} \right)^{r/k} \ln \left(\frac{1}{\cos^2(\alpha/2)} \right)^{d/k} (\sin \alpha)^{1/k} (\cos \alpha)^{2/k} tg \frac{\alpha}{2} d\alpha, \quad (39)$$

где

$$\bar{t}_* = \frac{p^{1/k} \varepsilon_{e0}^{d/k} \xi_{e0}^{1/k} D_1^{1/k} a^{1/k}}{\sigma_{e0}^{1/k} C_1^{1/k} h_0^{1/k}} t_*. \quad (40)$$

Для материалов, подчиняющихся кинетической теории вязкопластического течения и разрушения, повреждаемость находится из второго уравнения (4) так:

$$\dot{\omega}_e^{cp} = \frac{C_1 \left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) d\alpha}{\varepsilon_{e np}^{cp} dt} = \frac{C_1 tg \frac{\alpha}{2} d\alpha}{\varepsilon_{e np}^{cp} dt}. \quad (41)$$

Из этого следует, что

$$\omega_e^{cp} = \frac{C_1}{\varepsilon_{e np}^{cp}} \int_0^{\alpha} tg \frac{\alpha}{2} d\alpha = \frac{C_1}{\varepsilon_{e np}^{cp}} \ln \left(\frac{1}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}} \right). \quad (42)$$

Принимается, что $\varepsilon_{enp}^{cp} = const$, т.к. $\left(\frac{\sigma^{cp}}{\sigma_e}\right) = const$, $\frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e0}} = \frac{\xi_{e\ min}^{cp}}{\xi_{e0}} = 1$.

Угол α_* в момент разрушения определяется из условия, что $\omega_e = 1$:

$$\alpha_* = 2 \arccos e^{-\frac{\varepsilon_{enp}^{cp}}{2C_1}}, \quad (43)$$

т.е. предельные возможности формоизменения не зависят от времени.

Если подставить ω_e^{cp} по формуле (42), то величину давления $p(t)$ можно найти из выражения (30).

Рассмотрим вариант, когда $\xi_e^{cp} = \xi_{e1}^{cp}$. Если учесть выражение (19) при $\varphi = 0$, то получим уравнение (32) для определения давления $p(\alpha)$.

Повреждаемость вычисляется по выражению (42).

Зависимость α от времени находится из условия

$$\xi_{e1}^{cp} t = C_1 \ln \frac{1}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}, \quad \alpha = 2 \arccos e^{-\frac{\varepsilon_{e1}^{cp} t}{2C_1}}. \quad (44)$$

Пусть $p = const$. По формуле (42) определяется повреждаемость. Безразмерное время разрушения оболочки \bar{t}_* при $p = const$ находится по формуле (39) с заменой ω_A^{cp} на ω_e^{cp} .

Принимаем, что деформация оболочки описывается перемещением вершины купола от времени. Таким образом, уравнение (30) запишется как

$$p^{1/k} = \frac{\sigma_e^{1/k} C_1^{\frac{d+k}{k}} \left[\ln \left(1 + \frac{b^2}{a^2} t^{2f} \right) \right]^{d/k} 2^{\frac{1+k}{k}} \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{2k+1}{k}} h_0^{1/k}}{(\varepsilon_{e0})^{d/k} \xi_{e0} D_1^{1/k} a^{1/k} \left[1 + \frac{b^2}{a^2} t^{2f} \right]^{\frac{2+k}{k}}} \times \\ \times t^{\frac{(2k+1)f-k}{k}} \left(1 - \omega_A^{cp} \right)^{r/k}. \quad (45)$$

В соответствии с энергетической теорией разрушения повреждаемость может быть определена согласно уравнению (31), которое преобразуется следующим образом:

$$d\omega_A^{cp} = \frac{C_1 D_1 a p \left(1 + \frac{b^2}{a^2} t^{2f} \right) \frac{b}{a} f t^{f-1}}{A_{np}^{cp} h_0} dt . \quad (46)$$

Величины давления p и повреждаемости ω_A^{cp} определяются решением системы уравнений (45) и (46). Моменту времени t_* , когда $\omega_A^{cp} = 1$, соответствует разрушение оболочки.

Если материал подчиняется деформационному критерию разрушения, повреждаемость находится из уравнения (41), которое преобразуется к виду

$$d\omega_e^{cp} = \frac{C_1 \frac{b}{a} t^f \frac{b}{a} f t^{f-1}}{\varepsilon_{enp}^{cp} \left(1 + \frac{b^2}{a^2} t^{2f} \right)} dt . \quad (47)$$

Откуда следует, что

$$\omega_e^{cp} = \frac{C_1}{\varepsilon_{enp}^{cp}} \ln \left(1 + \frac{b^2}{a^2} t^{2f} \right) . \quad (48)$$

Время разрушения t_* определяется из (48) при $\omega_e^{cp} = 1$.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания №2014/227 на выполнение научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Российской Федерации на 2014 – 2020 годы и гранта РФФИ № 16-08-00020.

Список литературы

1. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.
2. Изотермическое деформирование металлов / С.З. Фиглин, В.В. Бойцов, Ю.Г. Калпин, Ю.И. Каплин. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.
3. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов / С.Н. Ларин [и др.]; под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 352 с.

Ларин Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Платонов Валерий Иванович, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Куприн Евгений Павлович, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Яковлев Сергей Сергеевич, студент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

**APPROACH TO ASSESSMENT DAMAGEABILITY DURING DEFORMATION
STRINGER GOVERNMENTAL STRUCTURES WITH CYLINDRICAL CHANNELS
OF DIFFERENT THEORIES CREEP AND DAMAGE**

S.N. Larin, V.I. Platonov, E.P. Kuprin, S.S. Yakovlev

In the article the expression for determining the cumulative damage of different groups of materials that obey the energy, kinetic theory of creep and damage, and in a viscoplastic material flow, implying the need to use as a basis for the use of both energy and kinetic theories of short-term creep and fracture.

Key words: forming, membrane deformation, defect, cylindrical channels.

Larin Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Platonov Valeriy Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kuprin Evgenij Pavlovich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Yakovlev Sergey Sergeevich, student, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСАДКИ КОНЦОВ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

А.А. Пасынков

Представлены результаты теоретических исследований напряженного и деформированного состояния заготовок при горячей высадке концов труб при постоянной регламентированной температуре и скоростях деформирования. Установлено влияние технологических параметров процесса и геометрических параметров заготовки на силовые режимы, напряженное и деформированное состояние. Исследование проводилось в среде программного комплекса *Qform 2D/3D*, основанного на базе метода конечных элементов. Сравнение полученных данных с результатами экспериментов показывает удовлетворительную сходимость.

Ключевые слова: высадка, *Qform 2D/3D*, изотермические условия, скорость деформирования, сила, напряжения.

В данной статье представлено продолжение теоретических исследований, основанных на верхнеграничной теореме пластичности [1], изотермической высадки концов труб из высокопрочных материалов при регламентированных скоростях штамповки. Схема рассматриваемой операции приведена на рис. 1.

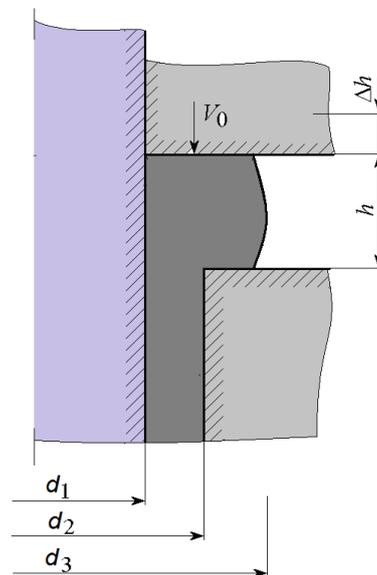


Рис. 1. Схема высадки

В данной работе в продолжение уже выполненных теоретических исследований выполнены исследования влияния технологических параметров на силовые режимы операции высадки с нагревом фланцевых

утолщений на трубных заготовках в среде программного комплекса Qform 2D/3D. Исследования выполнены для алюминиевого АМг6 ($\sigma_T = 210\text{МПа}$; $\sigma_\theta = 340\text{МПа}$; $\Pi = 750\text{МПа}$) и титанового ВТ6С ($\sigma_T = 210\text{МПа}$; $\sigma_\theta = 340\text{МПа}$; $\Pi = 750\text{МПа}$) сплавов. Расчеты выполнены при следующих геометрических характеристиках заготовки: $h = 3$ мм; $d_2 = 40; 35; 45$ мм; различных коэффициентах трения $\mu = 0,15; 0,4; 0,7$ и скоростях деформирования $V = 1...10\text{мм/с}$.

На рис. 2 приведены 3D-модели заготовки и инструмента. Предполагалось, что деформирование производится на гидравлическом прессе силой 50 МН при температурах деформирования 930 °С для титанового сплава и 450 °С алюминиевого сплава в изотермических условиях.

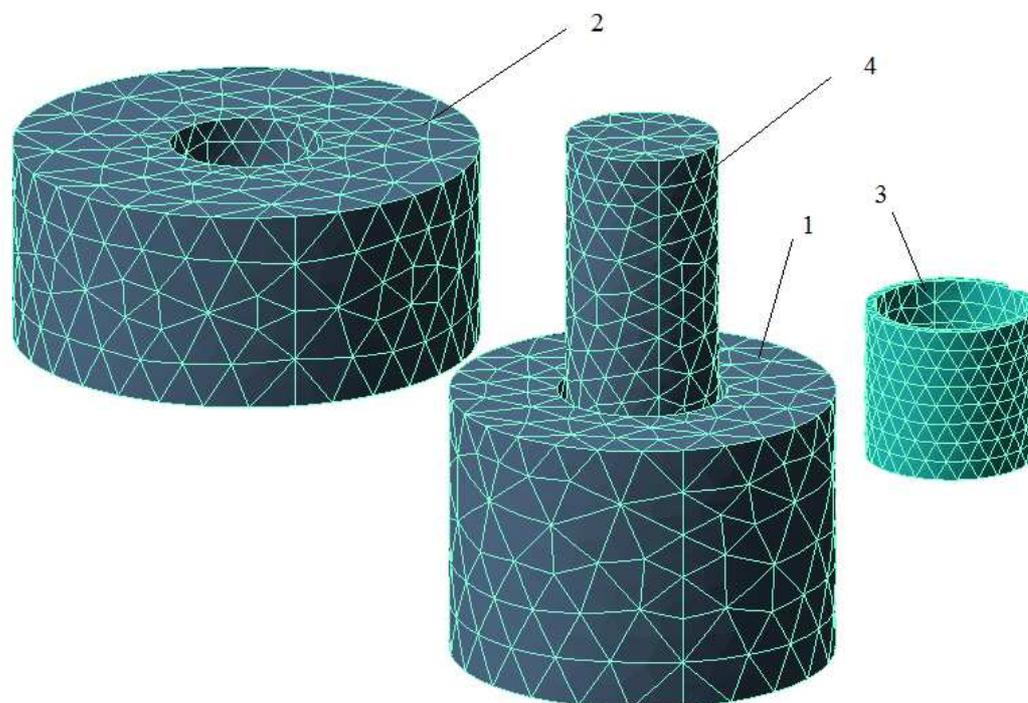


Рис. 2. 3D-модели инструмента и заготовки:
1 – заготовка; 2 – пуансон; 3 – матрица; 4 – оправка

На рис. 3 – 4 представлены схемы распределения деформаций по сечению заготовки при изотермической высадке для сплава при различных сечениях заготовок и коэффициентах трения для алюминиевого АМг6 и титанового ВТ6С сплавов. Из представленных схем видно, что интенсивность деформаций падает с увеличением трения и возрастает с увеличением относительной толщины заготовки. Из анализа представленных схем можно сделать вывод о том, что максимальные деформации располагаются на угловых элементах инструмента и на линии между ними.

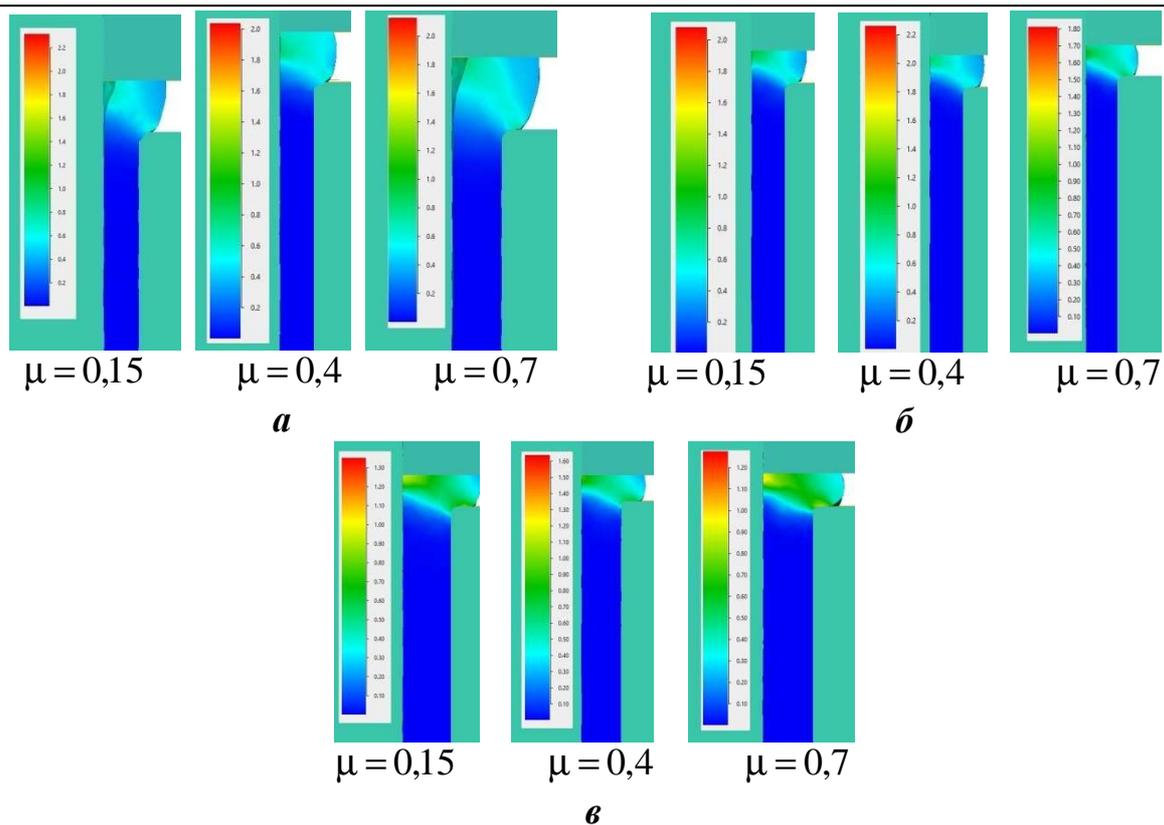


Рис. 3. Распределение деформаций по сечению заготовки при изотермической высадке для сплава ВТ6с:

а – $\bar{s} = 0,1$; **б** – $\bar{s} = 0,15$; **в** – $\bar{s} = 0,2$

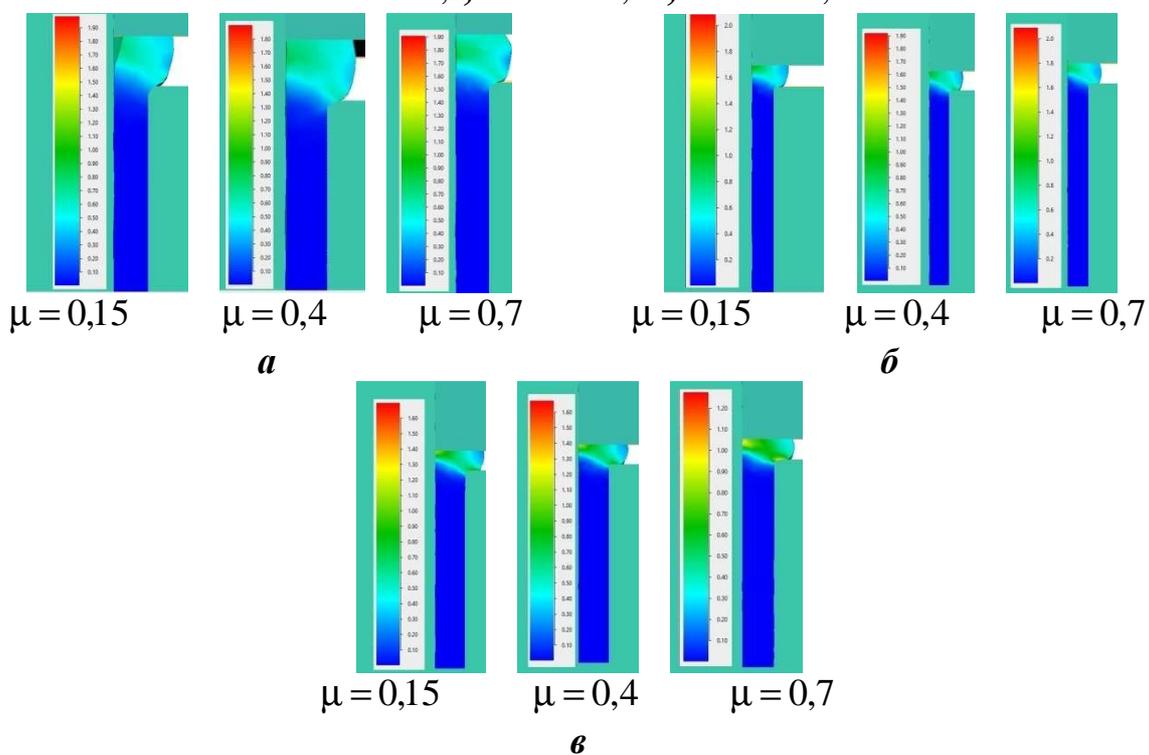


Рис. 4. Распределение деформаций по сечению заготовки при изотермической высадке для сплава АМз6:

а – $\bar{s} = 0,1$; **б** – $\bar{s} = 0,15$; **в** – $\bar{s} = 0,2$

На рис. 5 – 6 представлены схемы распределения интенсивностей напряжений по сечению заготовки при изотермической высадке для алюминиевого АМг6 и титанового ВТ6С сплавов. Из представленных схем видно, что напряженное состояние заготовок максимально на внешней поверхности заготовке, в месте формирования "бочки". Установлено, что как с увеличением трения, так и с увеличением относительной толщины заготовки интенсивность напряжений возрастает. Впрочем, при заданных технологических параметрах напряжения не достигают критической величины, приводящей к повреждению материала заготовки.

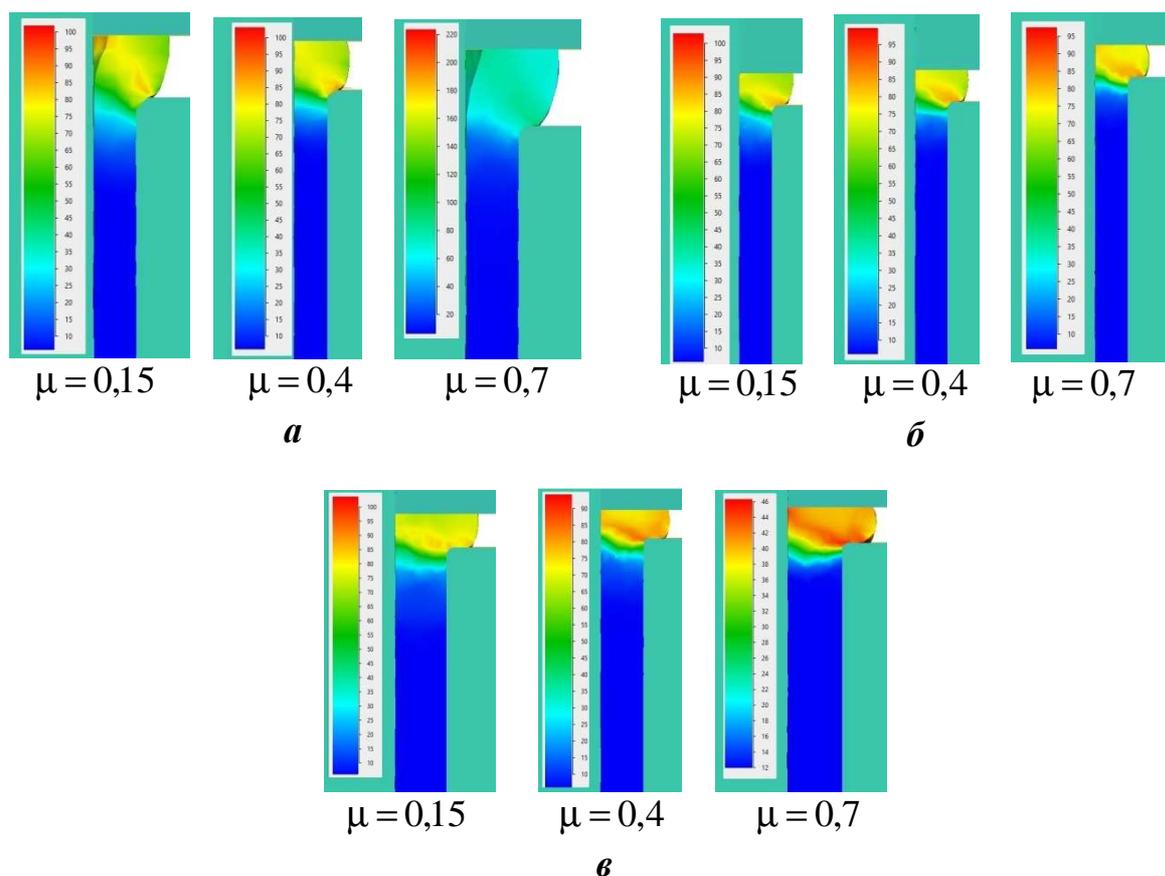


Рис. 5. Схема к оценке интенсивности напряжений (МПа) в сечении заготовки при изотермической высадке для сплава ВТ6с

Для более наглядного представления о влиянии технологических параметров на протекание процесса формоизменения были построены зависимости изменения силы процесса от величины хода инструмента при различных значениях трения и относительных толщин заготовки (рис. 6 – 10). Нелинейный характер кривых на представленных графиках свидетельствует о неравномерности структуры материалов заготовок. Для зависимостей, относящихся к заготовкам из титанового сплава, характерны большие значения силы деформирования.

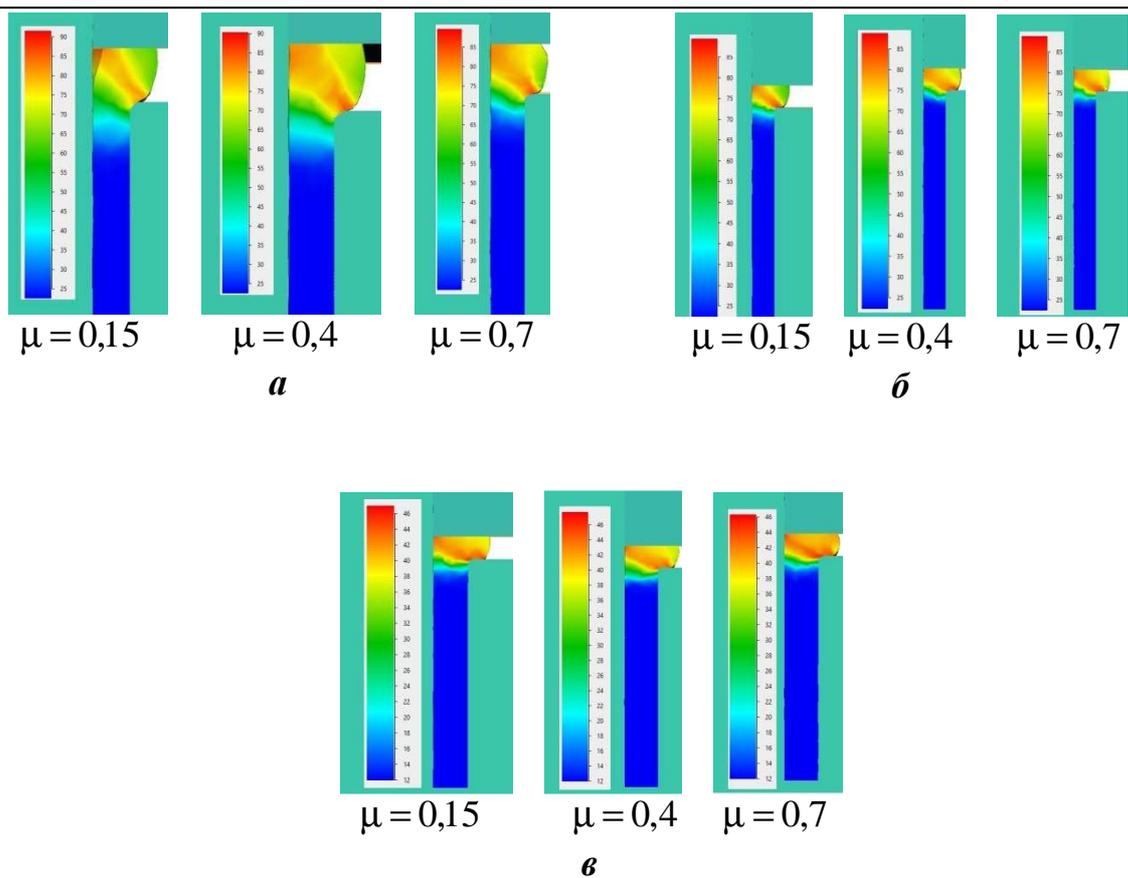


Рис. 6. Схема к оценке интенсивности напряжений (МПа) в сечении заготовки при изотермической высадке для сплава АМз6м

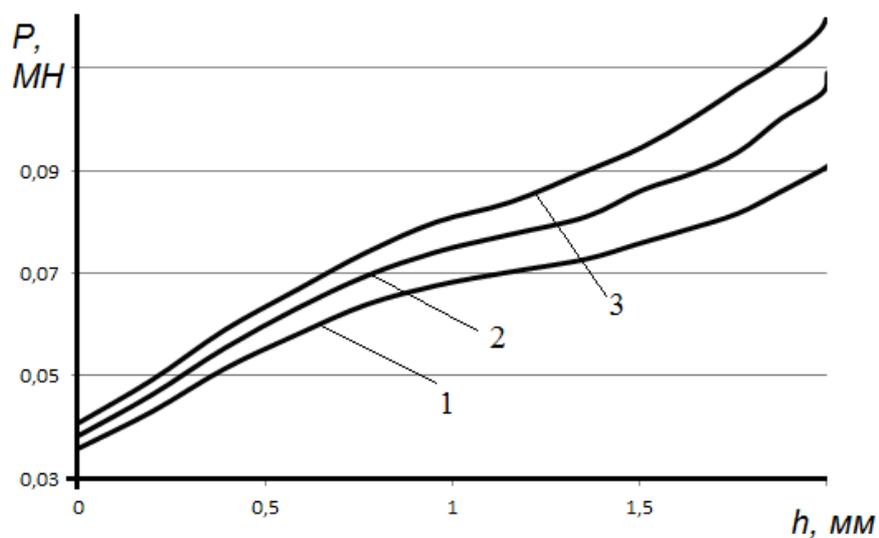


Рис. 7. Зависимости изменения силы высадки от величины хода инструмента при $\bar{\mu} = 0,15$ для сплава ВТ6с:

1 – $\mu = 0,15$; 2 – $\mu = 0,4$; 3 – $\mu = 0,7$

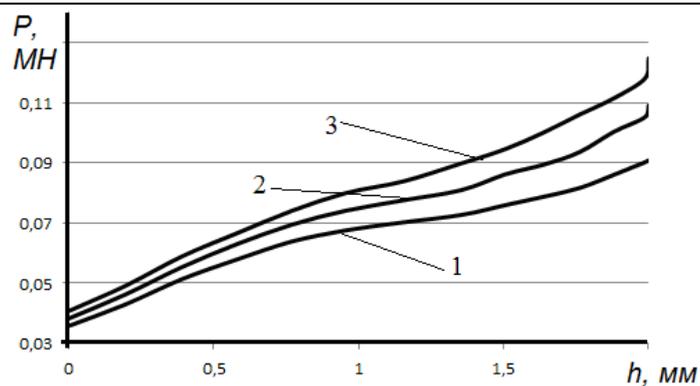


Рис. 8. Зависимости изменения силы высадки от величины хода инструмента при $\bar{s} = 0,2$ для сплава ВТ6с:
1 - $\mu = 0,15$; 2 - $\mu = 0,4$; 3 - $\mu = 0,7$

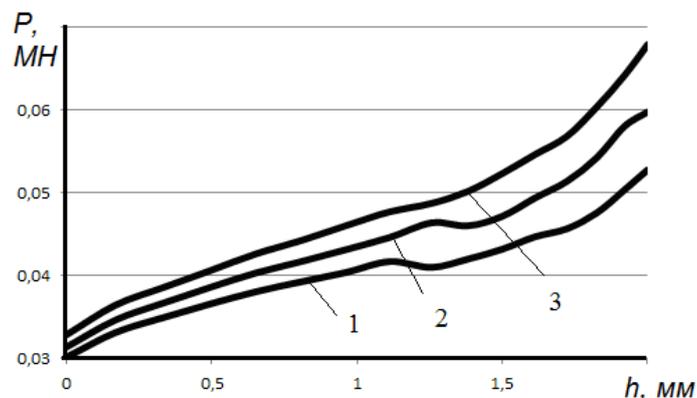


Рис. 9. Зависимости изменения силы высадки от величины хода инструмента при $\bar{s} = 0,15$ для сплава АМз6б:
1 - $\mu = 0,15$; 2 - $\mu = 0,4$; 3 - $\mu = 0,7$

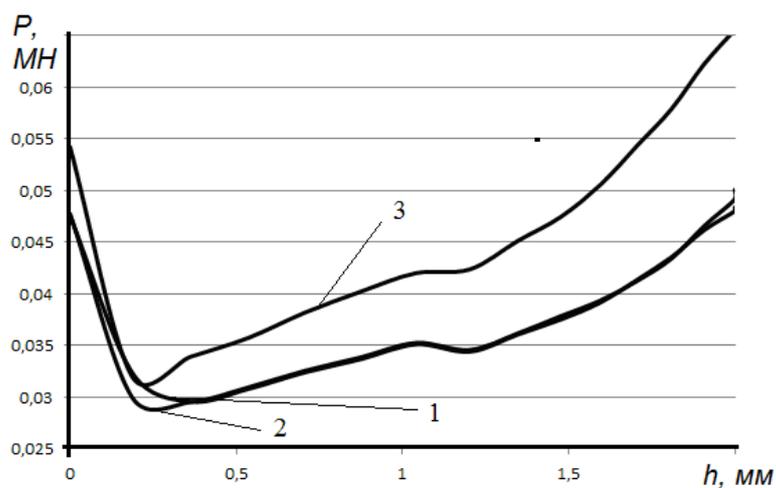


Рис. 10. Зависимости изменения силы высадки от величины хода инструмента при $\bar{s} = 0,2$ для сплава АМз6б:
1 - $\mu = 0,15$; 2 - $\mu = 0,4$; 3 - $\mu = 0,7$

Из анализа представленных зависимостей было установлено, что своих максимальных величин силы достигают в конце хода пуансона. Так же было выявлено, что как с увеличением трения, так и с увеличением относительной толщины заготовки сила возрастает.

На рис. 10 – 11 представлены зависимости изменения силы от коэффициента трения. Установлено что с увеличением трения сила возрастает.

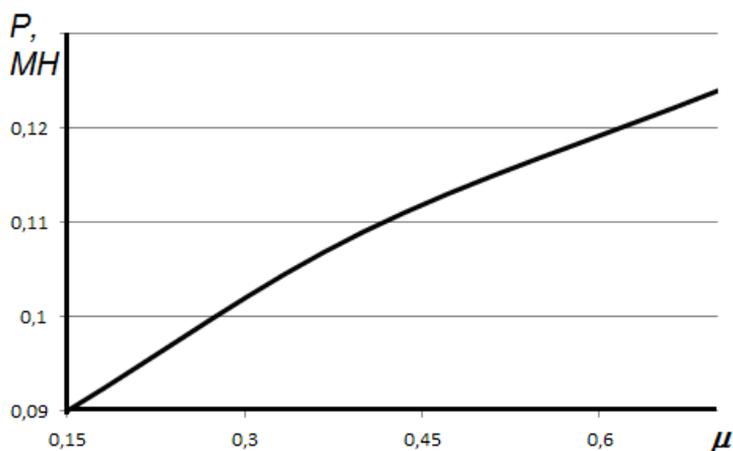


Рис. 11. Зависимости изменения силы высадки от трения для сплава ВТ6с

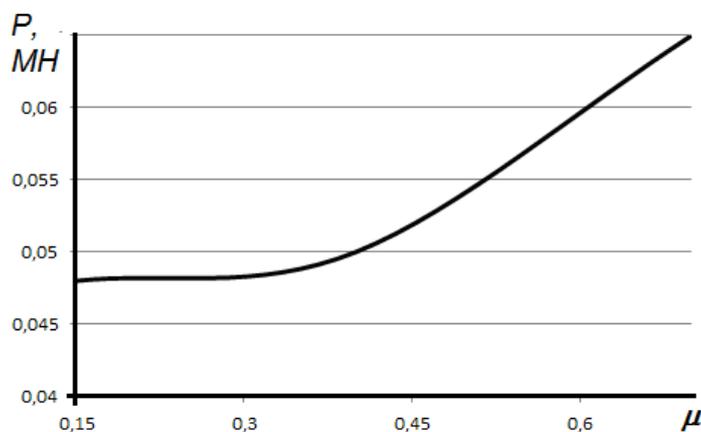


Рис. 12. Зависимости изменения силы высадки от трения для сплава АМгб

Для точной оценки напряженно-деформированного состояния в толщине заготовки были выбраны три точки, схема расположения которых приведена на рис. 13. Для оценки степени деформации и интенсивности напряжений в этих точках были построены зависимости, приведенные на рис. 13 – 15. Из анализа этих графиков было установлено, что степень деформации достигает наибольших значений в точке 2. В точках 1 и 3 она практически равна. В точке 3 напряжения достигают своих максимальных значений. В точках 1 и 2 они отличаются, но незначительно.

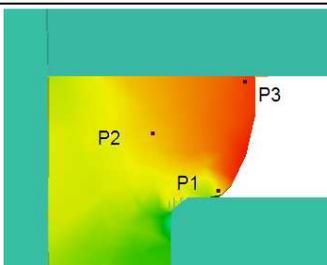


Рис. 13. Схема высадки с точками в сечении

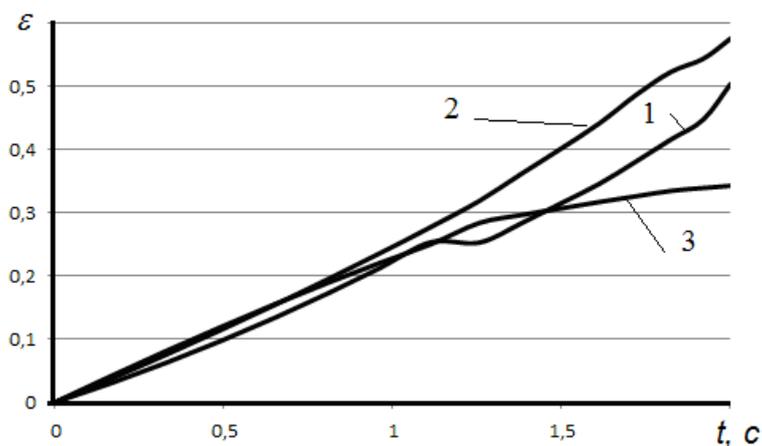


Рис. 14. Зависимости изменения степени деформации от времени деформирования для сплава АМгб: 1 – в точке P1; 2 – в точке P2; 3 – в точке P3

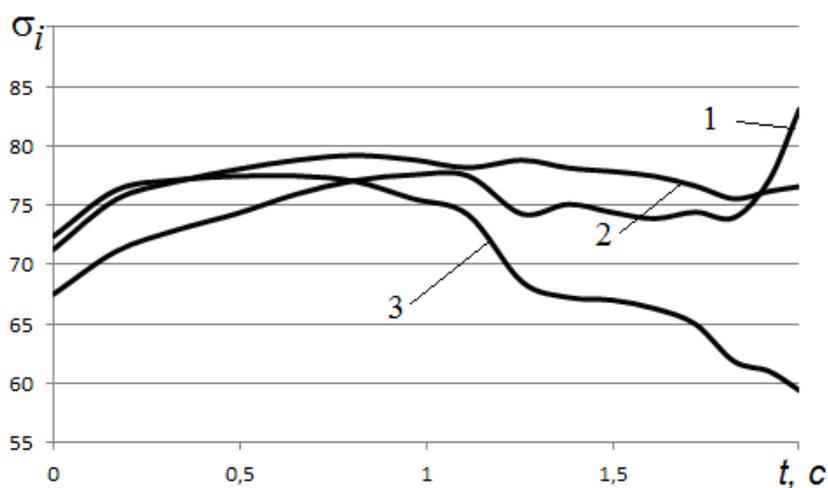


Рис. 15. Зависимости изменения интенсивности напряжений от времени деформирования для сплава АМгб: 1 – в точке P1; 2 – в точке P2; 3 – в точке P3

Сравнение данных, предоставленных в данной статье, с данными, основанными на верхнеграницной теореме пластичности, говорит о достаточной степени сходства [2 – 4]. Закономерности изменения зависимостей технологических параметров в данных исследованиях совпадают с экспе-

риментальными и теоретическими, основанными на верхнеграничной теореме пластичности, что говорит о допустимости использования программного комплекса Qform 2D/3D для исследования объемных процессов штамповки в изотермических условиях.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 15-48-03234_p_центр_a и РФФИ № 14-08-00066 а.

Список литературы

1. Яковлев С.С., Пасынков А.А., Ларина М.В. Оценка влияния технологических параметров процесса бокового выдавливания по плоской схеме деформаций на силовые режимы и качество получаемых изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 10. С. 13-19.

2. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов / С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, С.С. Яковлев, Я.А. Соболев. М.: Машиностроение, 2004. 427 с.

3. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, В.И. Трегубов, А.В. Черняев. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.

4. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

Пасынков Андрей Александрович, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

RESEARCH POWER PARAMETERS END UPSET TUBE BILLETS UNDER ISOTHERMAL CONDITIONS

A.A. Pasynkov

This article presents the results of theoretical studies of stress and strain state of preparations in the hot landing pipe ends at a constant regulated temperature and strain rates. The influence of process parameters and geometric parameters of the workpiece on the power modes, stress and strain state. A study made in an environment software package Qform 2d / 3d, based on the basis of the finite element method. Comparison of the data in the article with the results of experiments showing satisfactory convergence.

Key words: landing, Qform 2d / 3d, isothermal conditions, deformation speed, strength, power.

Pasynkov Andrey Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

К ОЦЕНКЕ СИЛОВЫХ РЕЖИМОВ ОПЕРАЦИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫТЯЖКИ КВАДРАТНЫХ КОРОБОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.В. Бессмертная, Б.С. Яковлев, А.Н. Малышев

На базе уравнений для определения максимального значения силы были исследованы силовые режимы процесса изотермической вытяжки низких квадратных коробок из листовой трансверсально-изотропной заготовки по схеме «круг – квадрат» в зависимости от скорости перемещения пуансона, условий трения на контактных поверхностях рабочего инструмента и заготовки, величины давления прижима. Установлено влияние анизотропии на силу рассматриваемой операции.

Ключевые слова: изотермическая вытяжка; низкие коробчатые детали, анизотропия, сила, мощности.

Одним из технически трудно реализуемых процессов листовой штамповки можно считать вытяжку деталей коробчатых форм. Вследствие труднопредсказуемого характера течения материала, подвергаемого деформации, технологические вычисления требуемых форм заготовок и операций вытяжки, кинематики, напряженного состояния, силовых параметров затруднительны. В промышленности при разработке технологических процессов штамповки обычно применяют рекомендации и данные, полученные в ходе технологической практики. В работах [1 – 3] представлены теоретические и технологические расчеты процесса вытяжки целого ряда деталей коробчатых формы по определению напряженного состояния и кинематики, влияния геометрических параметров заготовок. Технология вытяжки касательно форм заготовок и переходов, степеней деформаций сильно зависит от относительных геометрических параметров получаемых коробчатых деталей, поэтому вытяжка осуществляется за одну или несколько переходов. В данной статье рассмотрены процессы вытяжки низких коробок. Они формообразуются обычно за одну операцию.

Расчеты операций изотермической вытяжки коробок будем производить исходя из экстремальной верхнеграничной теоремы [4], в соответствии с которой справедливо неравенство

$$PV_n \leq W_{вн} + W_p + W_{тр}. \quad (1)$$

В этом неравенстве левая часть – мощность внешних сил P при заданной скорости движения пуансона V_n ; правая часть – соответственно мощность внутренних сил деформаций, мощность на линиях разрыва скоростей и мощность трения на поверхностях контакта материала с инструментом.

Неравенство (1) предполагает использование кинематики течения деформируемого материала и приводит к «нижней» оценке сил из всех кинематически возможных «верхних».

Материал детали принимаем трансверсально-изотропным, механическое состояние которого определяется выражением

$$\sigma_e = k \varepsilon_e^m \dot{\xi}_e^n, \quad (2)$$

где σ_e – интенсивность напряжений; ε_e , $\dot{\xi}_e$ – соответственно эквивалентные деформация и скорость деформации; k , m и n – константы материала.

Выражение (2) описывает состояние материала при деформировании в вязкопластических условиях. При формообразовании без подогрева материал обычно является жесткопластическим с деформационным упрочнением ($m \neq 0$, $n = 0$). При горячем формообразовании отсутствует упрочнение, и материал нелинейно-вязкий ($m = 0$, $n \neq 0$). В последующем для разных форм деталей рассмотрим кинематику и напряженно-деформированное состояние фланца изделия на плоскости и кромке матрицы. На плоскости матрицы напряженное состояние принимается плоским; на кромке – состояние плоской деформации.

Оценка мощности внутренних сил в одной зоне деформаций

$$W_{вн} = \varphi \int_{r_n + \frac{a}{\sin \frac{\pi}{4}}}^{r_0} \sigma_e \dot{\xi}_e \delta r dr, \quad (3)$$

где φ – угол, определяющий зону деформаций; r_0 , r_n – радиус заготовки и угловой радиус пуансона; r – радиальная координата точки в зоне деформации.

По уравнению (1) для определения мощностей в зонах деформаций фланца необходимо вычислить входящие в это уравнение величины.

Мощность на одной линии разрыва записывается в виде

$$W_p = \tau_p V_p \delta_0 r_1 \sqrt{1 + 3 \sin^2 \gamma} \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta}, \quad (4)$$

где

$$\tau_p = k \eta \chi^{m+n} V_n^n \cdot r_n^{1+R} \cdot r^{\frac{n(1+2R)}{1+R}} \cdot \left(\ln \frac{r}{r_n} \right)^m;$$

$$V_p = \frac{(V_p)_n}{\sin \gamma} = V_n \left[\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} - \left(\frac{r_n}{r_1} \right)^{\frac{R}{1+R}} \right] \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}; \quad \gamma = \arctg \left[\frac{\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} - \left(\frac{r_n}{r_1} \right)^{\frac{R}{1+R}}}{\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} - \left(\frac{r_n}{r_1} \right)^{\frac{R}{1+R}}} \right] \operatorname{tg} \alpha;$$

$$l_p = r_1 \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta}.$$

Мощность трения заготовки на инструменте вычисляется с помощью интеграла

$$W_{mp} = \mu q V_n \left\{ \frac{2(1+R)}{2+R} \varphi r_n \left[r_0^{1+R} - \left(r_n + \frac{a}{\sin \frac{\pi}{4}} \right)^{1+R} \right] + \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) \left[r_0^2 - (a + r_n)^2 \right] \right\}, \quad (5)$$

что соответствует мощности трения на поверхностях матрицы и прижима для четверти заготовки.

Провести верхнеграничную оценку силы рассматриваемой операции по энергетическому неравенству (1) позволяют расчеты мощности деформаций (3), мощности на линиях разрыва скоростей (4) и трения (5).

Упростить приведенные выше выражения можно, используя в качестве линий разрыва ортогональные прямые, проходящие через центры угловых радиусов (точка O_1) параллельно осям x , y (рис. 1). Установим распределение толщины фланца в зонах деформаций.

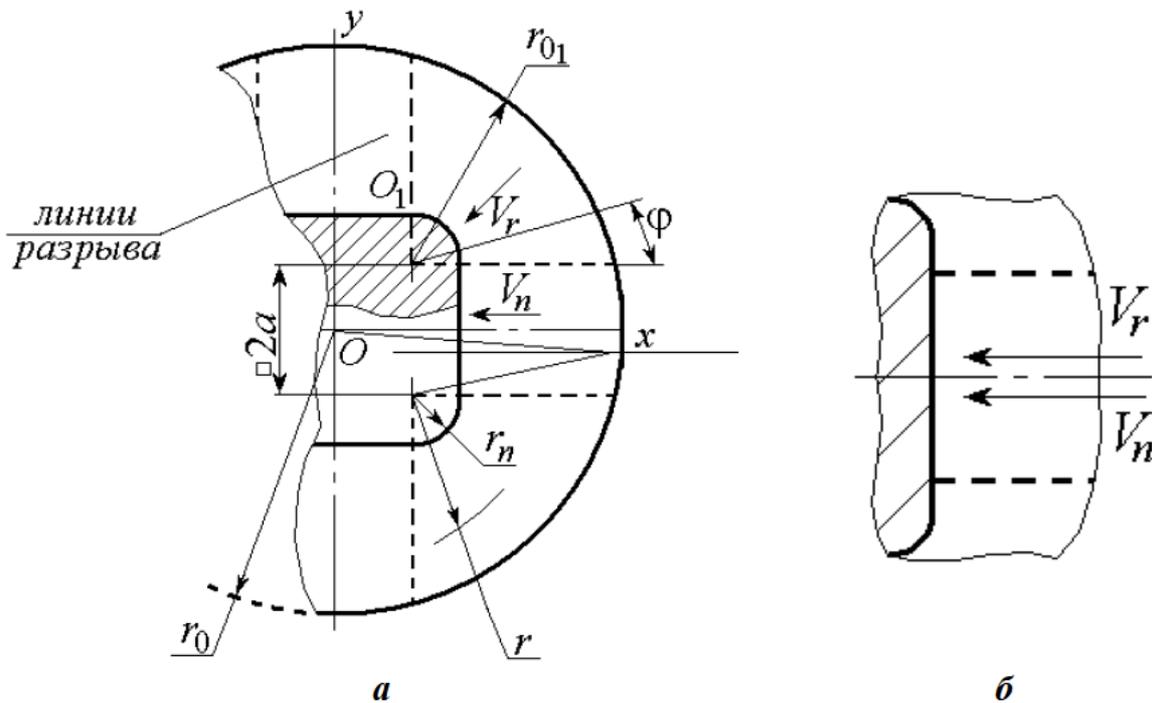


Рис. 1. Разрывное поле скоростей (а) и план скоростей (б) на линии разрыва при вытяжке низкой квадратной коробки

Так как

$$\xi_{\delta} = \frac{d\varepsilon_{\delta}}{dt} = \frac{d\delta}{\delta} \cdot \frac{1}{dt}, \quad dt = \frac{dr}{V_r} = \frac{1}{V_n} \left(\frac{r}{r_n} \right)^{\frac{R}{1+R}} \cdot dr,$$

то в соответствии с принятой функцией скорости $V_r = V_n \left(\frac{r_n}{r} \right)^{\frac{R}{1+R}}$ получим соотношение для распределения толщины в виде

$$\delta = \delta_0 \left(\frac{r}{r_n} \right)^{\frac{1}{1+R}}, \quad (6)$$

что удовлетворяет условиям $r = r_n, \delta = \delta_0; r = r_0, \delta = \delta_{кр} = \delta_0 \left(\frac{r_0}{r_n} \right)^{\frac{1}{1+R}}$.

Радиус дуги окружности внешнего контура зоны деформаций относительно центра перемещений запишем с точки O_1 :

$$r_{01} = a(\sin \varphi + \cos \varphi) \left[\sqrt{1 - \frac{2a^2 + r_0^2}{a^2(\sin \varphi + \cos \varphi)}} - 1 \right]. \quad (7)$$

Здесь $0 \leq r \leq r'_{01}$ – текущая радиальная координата точки в зоне деформаций; r_0 – радиус заготовки с центром в точке O ; $2a$ – расстояние между угловыми центрами; $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ – угловая координата этой точки.

Выражение для мощности внутренних сил (3), учитывая соотношения (2), (6), (7):

$$W_{вн} = 4k\chi^{1+m+n} \cdot \delta_0 V_n^{1+n} \cdot r_n^{\frac{(1+n)R-1}{1+R}} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[\int_{r_n}^{r_{01}} r^{\frac{1-(1+n)(1+2R)}{1+R}} \cdot \left(\ln \frac{r}{r_n} \right)^m dr \right] d\varphi.$$

Данный интеграл решается численным методом. Для упрощения полученного выражения функцию внутреннего интеграла можно представить в следующем приближенном виде:

$$\left(\frac{1}{r_n} \right)^m \left(1 - m \frac{r_n}{r} \right) r^{1+m+\frac{1-(1+n)(1+2R)}{1+R}}.$$

Мощность внутренних сил после интегрирования по координате r определяется так:

$$W_{\text{вн}} = 4k\chi^{1+m+n} \cdot \delta_0 V_n^{1+n} \cdot r_n^{\frac{(1+n)R-1}{1+R}-m+p} \times \\ \times \int_0^{\pi/2} \left\{ \frac{1}{p} \left[\left(\frac{r_{01}}{r_n} \right)^p - 1 \right] - \frac{m}{p-1} \left[\left(\frac{r_{01}}{r_n} \right)^{p-1} - 1 \right] \right\} d\varphi, \quad (8)$$

где $p = 2 + m + \frac{1 - (1+n)(1+2R)}{1+R}$.

Для последующего численного интегрирования по координате φ необходимо в выражение (8) подставить формулу (7).

Для определения мощности на линиях разрыва скоростей можно записать требуемые соотношения, где $V_r \parallel l_p$, $V_n \parallel l_p$ и вектор скорости разрыва совпадает с линией разрыва. Величина разрыва скорости

$$V_p = V_n - V_r = V_n \left[1 - \left(\frac{r_n}{r_{01}} \right)^{\frac{R}{1+R}} \right]. \quad (9)$$

Разрыв принимается постоянным на всей линии и вычисляется по внешней краевой точке во фланце, что записано в формуле (9). Положение данной точки задается радиусом r_{01} , что выражается из формулы (7) при $\varphi = 0$.

Толщину фланца на линии разрыва считаем постоянной, равной толщине в точке пересечения внешнего контура фланца и линии разрыва, т.е.

$$\delta_p = \delta_0 \left(\frac{r_{01}}{r_n} \right)^{\frac{1}{1+R}} = \delta_0 \left(\frac{-a + \sqrt{r_0^2 - a^2}}{r_n} \right)^{\frac{1}{1+R}} \quad (10)$$

при $r_{01} = -a + \sqrt{r_0^2 - a^2}$, что следует из формулы (6) после подстановки (7), где $\varphi = 0$.

Эквивалентная деформация на линии разрыва

$$(\varepsilon_e)_p = (\varepsilon_e)_{\text{пл}} - (\varepsilon_e)_{\text{жс}} = \chi \ln \frac{r}{r_n}, \quad (11)$$

где $(\varepsilon_e)_{\text{пл}}$, $(\varepsilon_e)_{\text{жс}}$ – эквивалентные деформации в пластической и жесткой зонах соответственно.

Соотношение (11) и его производная по времени, т.е. эквивалентная скорость деформаций, позволяет вычислить касательное напряжение

$$\tau_p = k\eta\chi^{m+n} V_n^n \cdot r_n^{\frac{nR}{1+R}} \cdot r^{\frac{n(1+2R)}{1+R}} \cdot \left(\ln \frac{r}{r_n} \right)^m \text{ на линиях разрыва.}$$

Последующая подстановка соотношений (9), (10),

$$\tau_p = k\eta\chi^{m+n} V_n^n \cdot r_n^{1+R} \cdot r^{-\frac{n(1+2R)}{1+R}} \cdot \left(\ln \frac{r}{r_n}\right)^m$$
 в равенство

$$\left. \begin{aligned} (V_r)_n &= V_r \sin \alpha, & (V_n)_n &= V_n \sin \beta; \\ (V_r)_\tau &= V_r \cos \alpha, & (V_n)_\tau &= V_n \cos \beta \end{aligned} \right\}$$

при $\varphi = 0$ приводит к интегралу мощности на линиях разрыва скоростей, а именно

$$W_p = 8k\eta\chi^{m+n} \cdot \delta_0 \cdot V_n^{1+n} \cdot r_n^{\frac{nR-1}{1+R}} \cdot \left[1 - \left(\frac{r_n}{(r_0)_{01}} \right)^{\frac{R}{1+R}} \right] \times \\ \times (r_{01})^{\frac{1}{1+R}} \cdot \int_{r_n}^{r_{01}} r^{-\frac{n(1+2R)}{1+R}} \cdot \left(\ln \frac{r}{r_n} \right)^m dr.$$

Подынтегральную функцию заменим разложением

$$\left(\frac{r}{r_n} \right)^p \left(1 - m \frac{r_n}{r} \right),$$

где $p = 1 + m - \frac{n(1+2R)}{1+R}$.

Учитываем, что на линии разрыва радиус внешнего контура фланца $r_{01} = -a + \sqrt{r_0^2 - a^2}$ – величина постоянная, не зависящая от координат r , φ .

После интегрирования получим

$$W_p = 8k\eta\chi^{m+n} \delta_0 V_n^{1+n} r_n^{p-m+\frac{nR-1}{1+R}} \left(-a + \sqrt{r_0^2 - a^2} \right)^{\frac{1}{1+R}} \left[1 - \left(\frac{r_n}{-a + \sqrt{r_0^2 - a^2}} \right)^{\frac{R}{1+R}} \right] \times \\ \times \left\{ \frac{1}{p} \left[\left(\frac{-a + \sqrt{r_0^2 - a^2}}{r_n} \right)^p - 1 \right] - \frac{m}{p-1} \left[\left(\frac{-a + \sqrt{r_0^2 - a^2}}{r_n} \right)^{p-1} - 1 \right] \right\}. \quad (12)$$

Вернемся к определению мощности сил трения, записанной в виде интеграла $W_{mp} = \int_S \tau_k V_k ds$. Примем, что контактное напряжение трения за-

висит от нормального давления прижима и определено ранее соотношени-

ем $\tau_k \approx \mu q$. Запишем контактную скорость в зонах деформаций следующим образом: $V_r = V_n \left(\frac{r_n}{r} \right)^{\frac{R}{1+R}}$, где V_n - скорость жестких зон. Исходя из этого, получим

$$W_{\delta\delta} = 8\mu q V_n \left[\frac{R}{r_n^{1+R}} \int_0^{\pi/2} \int_{r_n}^{r_{01}} \frac{1}{r^{1+R}} dr d\varphi + \left(2 \int_0^a (r_0^2 - x^2)^{1/2} dx - a(a + r_n) \right) \right].$$

После интегрирования по координате r имеем следующую зависимость:

$$W_{mp} = 8\mu q V_n \left\{ \frac{1+R}{2+R} r_n^2 \int_0^{\pi/2} \left[\left(\frac{r_{01}}{r_n} \right)^{\frac{2+R}{1+R}} - 1 \right] d\varphi + \left[a\sqrt{r_0^2 - a^2} - a(a + r_n) + r_0^2 \arcsin \frac{a}{r_0} \right] \right\}. \quad (13)$$

Здесь радиус r_{01} необходимо записать с помощью формулы (7), после чего будет произведено интегрирование по φ .

Подстановка данных соотношений для мощностей $\gamma = \arctg \frac{(V_p)_n}{(V_p)_\tau}$,

(12) в неравенство (1) приведет к оценке максимальной силы при вытяжке коробки квадратной формы в зависимости от скорости процесса.

В зависимости от скорости движения пуансона V_n , условий трения на контактных поверхностях рабочего инструмента и заготовки, величины давления прижима q исследовались силовые режимы процесса изотермической вытяжки низких квадратных коробок из листовой трансверсально-изотропной заготовки по схеме «круг – квадрат».

На рис. 2 представлены графические зависимости изменения максимальной величины относительной силы $\bar{P} = P/(F\sigma_e)$ процесса изотермической вытяжки низких деталей коробчатой формы из листовой заготовки, которая является трансверсально-изотропной по схеме «круг – квадрат» от скорости движения пуансона V_n для сплава АМгб при следующих температурах обработки $T = 450^\circ\text{C}$ и $T = 530^\circ\text{C}$, и титанового сплава ВТб при $T = 930^\circ\text{C}$, где F – площадь действия прижима.

Механические свойства данных материалов приведены в табл. 1 – 3 [4]. Нужно отметить, что при анализе экспериментальных данных авторы работы [4] не учитывали влияние эквивалентной скорости деформации ξ_e

на величину предельной эквивалентной деформации ϵ_{enp} или предельной величины удельной работы разрушения A_{np} ($A_2=0$ или $A'_2=0$). Расчеты выполнены при $r_0 = 50$ мм; $r_n = 8$ мм; $a = 17$ мм; $\delta_0 = 1$ мм; $q = 2$ МПа. В соответствии с рекомендациями [4] назначалась величина давления прижима q .

Таблица 1

**Механические характеристики алюминиевого АМгб
и титанового ВТб сплавов**

Сплав	T, C°	R	$\sigma_e = k\epsilon_e^m \zeta_e^n$		
			$k, \text{МПа}/c^n$	m	n
Алюминиевый АМгб	450	0,68	54,57	0,104	0,0263
	530	0,86	36,94	0,072	0,0306
Титановый ВТб	930	1,06	66,75	0,028	0,0582

Таблица 2

Константы материала

Материал	Температура испытаний, $^\circ C$	$C', \text{МПа}$	A'_1
Алюминиевый сплав АМгб	450 ± 2	151,2	-1,421
	530 ± 2	41,41	-1,421

Таблица 3

Константы материала

Материал	Температура испытаний, $^\circ C$	C	A_1
Титановый сплав ВТбС	930 ± 2	0,443	-1,19

Анализ зависимостей на рис. 2 и результатов произведенных расчетов показал, что с увеличением скорости перемещения пуансона V_i , трения μ на поверхности контакта рабочего инструмента и заготовки величина относительной силы \bar{P} растет.

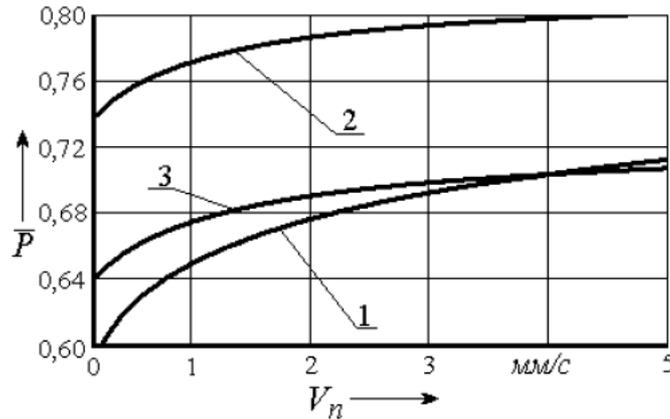


Рис. 2. Зависимости изменения \bar{P} от V_n :
кривая 1 – сплав ВТ6 ($T = 930^\circ\text{C}$); кривая 2 – сплав АМз6 ($T = 450^\circ\text{C}$);
кривая 3 – сплав АМз6 ($T = 530^\circ\text{C}$)

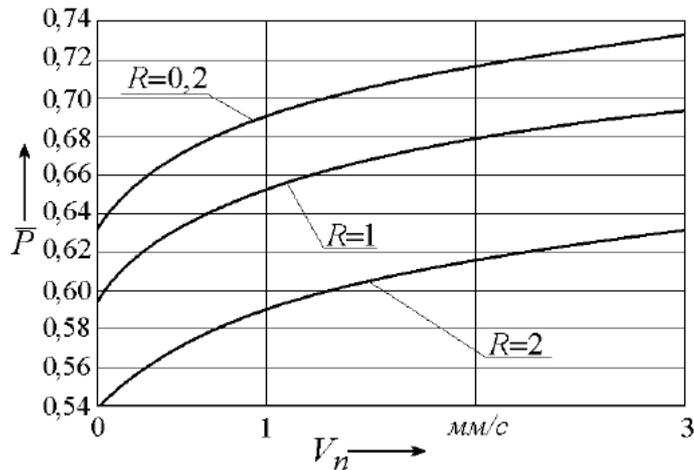


Рис. 3. Зависимости изменения \bar{P} от V_n

На рис. 3 приведены графики зависимости изменения относительной величины силы процесса \bar{P} от скорости перемещения пуансона V_n при заданных коэффициентах нормальной анизотропии R . Расчеты произведены при $r_0 = 50$ мм; $r_n = 8$ мм; $a = 17$ мм; $\delta_0 = 1$ мм; $q = 2$ МПа, $k = 66,75$ МПа/сⁿ; $m = 0,028$; $n = 0,0582$; $\sigma_e = 100$ МПа, где $F = 4(2a + \pi r_n / 2)\delta_0$. Давление прижима q назначалось в соответствии с данными, приведенными в работе [5]. Анализ произведенных расчетов и зависимостей, приведенных на рис. 3, показал, что с уменьшением коэффициента нормальной анизотропии R и повышением скорости движения пуансона V_n величина силы процесса \bar{P} возрастает.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 16-38-00082 мол_а, № 14-08-00066 а.

Список литературы

1. Вайнтрауб Д.А. Технология глубокой вытяжки прямоугольных коробок. Л.: ЛДНТП, 1957. 98 с.
2. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Л.: Машиностроение, 1980. 432 с.
3. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
4. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов / С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, С.С. Яковлев, Я.А. Соболев. М: Машиностроение-1, Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. 427 с.
5. Ашкенази Е.К. Анизотропия машиностроительных материалов. Л.: Машиностроение, 1969. 112 с.

Бессмертная Юлия Вячеславовна, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Яковлев Борис Сергеевич, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Малышев Александр Николаевич, канд. техн. наук, доц., amalyshv@ru.gestamp.com, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

TO THE ASSESSMENT OF POWER MODE OPERATION ISOTHERMAL EXTRACT SQUARE BOXES FROM HIGH ANISOTROPIC MATERIALS

Y.V. Bessmertnaya, B.S. Yakovlev, A.N. Malyshev

On the basis of equations for determining the maximum value of the force were examined power modes during isothermal drawing low square boxes of sheet transversely isotropic workpiece on a "circle - square" depending on the speed of movement of the punch, friction conditions on the contact surfaces of the working tool and the workpiece, the pressure value pressing. Installed, but the effect on the anisotropy effect the transaction in question.

Key words: insulated hood; low box-shaped parts, anisotropy, strength, power.

Bessmertnaya Yuliya Vyacheslavovna, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Yakovlev Boris Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Malyshev Aleksandr Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, amalyshv@ru.gestamp.com, Russia, Kaluga, Kaluga Branch of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman

ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ОТБОРТОВКА ЗАГОТОВОК ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМЕ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОСТИ

В.Н. Чудин, А.А. Пасынков, Г.А. Нуждин

Рассмотрен процесс изотермической отбортовки заготовок из анизотропных материалов в условиях вязкопластического течения. Принимается плоское напряженное состояние, течение материала радиальное, материал заготовки трансверсально-изотропный. Приведены выражения для оценки энергосиловых режимов и повреждаемости. Неоднородность оценивали по деформационной и энергетической теориям прочности и ползучести для вязкопластичных материалов.

Ключевые слова: вязкопластическое состояние, давление, сплошность, ползучесть, трансверсально-изотропные материалы.

В технологиях штамповки нашли широкое применение операции отбортовки. Практически во всех отраслях машиностроения имеет место широкая номенклатура изделий, изготавливаемых этими способами [1, 2]. Отбортовка может реализовываться как без нагрева, так и с нагревом деформируемой заготовки. Применение нагрева необходимо при производстве деталей из труднодеформируемых материалов, в этом случае материал проявляет свои вязкие свойства. Используется взаимосвязь технологических режимов от температурно-скоростных условий обработки. Рассмотрим изотермическую отбортовку заготовок из анизотропных материалов в режимах вязкопластического течения материала, схема которой показана на рис. 1. Напряженное состояние принимается плоским, а течение материала в зоне деформаций радиальным. Материал заготовки – трансверсально-изотропный. Компоненты скоростей деформации в этом случае будут определяться по соотношениям

$$\xi_r = -\frac{dV_r}{dr}, \quad \xi_\varphi = -\frac{V_r}{r}, \quad \xi_\delta = \xi_z = -\xi_r - \xi_\varphi; \quad (1)$$

$$V_r = V_n \left(\frac{r_1}{r} \right)^f - \quad (2)$$

радиальная скорость перемещения точек в области деформации; V – радиальная координата точки; r – радиальная координата точки; r_1 – радиус изделия (отбортовка) в соответствии с рис 1; V_n – скорость перемещения пуансона; R – коэффициент анизотропии материала заготовки; $f = R/(1 + R)$.

Исходя из зависимостей (1), определяем эквивалентную скорость деформации

$$\xi_e = k V_n r_1^f r^{-1-f}. \quad (3)$$

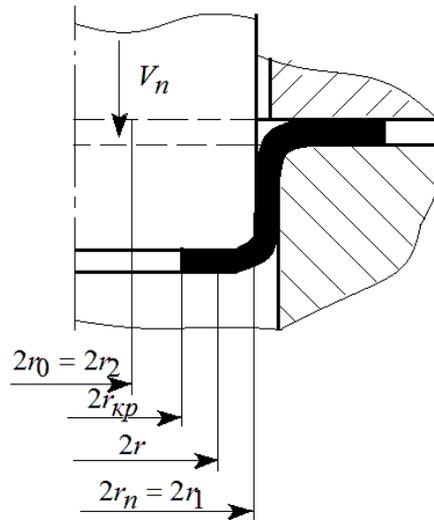


Рис. 1. Расчетная схема отбортовки

Значение эквивалентной деформации будем рассчитывать по крайним точкам заготовки. Принимая во внимание соотношения (2) и (3), получим, что

$$\varepsilon_e = \int_t \xi_e dt = \int_r \xi_e \frac{dr}{V_r} = k \left| \ln \frac{r_0}{r_{kp}} \right|, \quad (4)$$

где $k = \left[\frac{2(2+R)}{3(1+R)} \right]^{1/2}$; r_{kp} – радиальные координаты крайних точек зоны деформации на текущей стадии.

На конечном этапе $r_{kp} = r_1$ (рис. 1). Зависимость текущей толщины формоизменяемого края заготовки

$$\delta = \delta_0 \left(\frac{r_0}{r_{kp}} \right)^{1-f}. \quad (5)$$

В соответствии с условием пластичности Мизеса-Хилла при плоском напряженном состоянии напряжения будут определяться следующим образом:

$$1 + \frac{\sigma_r}{\sigma_\phi} \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_\phi} - 2f \right) = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_\phi} \right)^2, \quad (6)$$

где σ_r , σ_ϕ – компоненты напряжений. Из уравнений состояния деформируемых материалов вытекает эквивалентное напряжение в условии (6). При отсутствии линейной вязкопластичности, принимая во внимание выражения (3) и (4), оно примет вид

$$\sigma_e = A \psi^n \varepsilon_e^m \xi_e^n = AKr^\lambda, \quad (7)$$

где ψ – сплошность в материале деформируемой заготовки при зафиксированном r_{kp} ; A , η , λ – константы; $K = \psi^n k^{m+n} (V_n r_1^f)^n \left| \ln \frac{r_0}{r_{kp}} \right|^m$; $\lambda = -(1+f)n$.

Если вязкость не учитывается, то $n = 0$ и поведению материала соответствует выражение жесткопластичности с упрочнением. Если принято $\psi = 1$, то учет сплошности материала не проводится.

Вводим далее параметр, учитывающий вид напряженного состояния (параметр Лодэ – Надаи) [3]:

$$\mu_\sigma = \frac{\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}. \quad (8)$$

Здесь главные напряжения

$$\sigma_1 = \sigma_\phi > 0, \quad \sigma_2 = \sigma_r > 0, \quad \sigma_3 = -\sigma_z = 0.$$

В соответствии с введенным параметром (8) получаем

$$(\mu_\sigma)_3 = -1 + 2 \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_\phi} \right). \quad (9)$$

Решая совместно условие текучести (6) и выражение параметра вида напряженного состояния (9), определяем окружное напряжение как

$$\sigma_\phi = p \sigma_e. \quad (10)$$

Здесь $p = p_3 = \left[1 + \frac{1}{2} (1 + (\mu_\sigma)_3) \left(\frac{1}{2} (1 + (\mu_\sigma)_3) - 2f \right) \right]^{-1/2}$.

Для трансверсально-изотропных материалов в условиях плоского напряженного состояния выражение (10) представляет собой приближенное условие пластичности.

Для определения компонент напряжений в зоне деформации рассмотрим уравнение равновесия [3]

$$\frac{d}{dr} (\delta \sigma_r) + \frac{\delta}{r} (\sigma_r - \sigma_\phi) = 0. \quad (11)$$

Принимаем $\delta = \delta_0$. Подставив в уравнение (11) выражения (5), (6) и условие (10), получим

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r = p \sigma_e. \quad (12)$$

Приведенное дифференциальное уравнение неоднородное. Решение этого уравнения представим в виде

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \cdot C(r), \quad (13)$$

где $C(r)$ – константа.

При этом

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{1}{r} C'(r) - \frac{1}{r^2} C(r).$$

Внеся это выражение в исходное уравнение (12), получаем

$$C'(r) = p\sigma_e.$$

Отсюда

$$C(r) = p \int \sigma_e dr = \frac{pAK}{1+\lambda} r^{1+\lambda} + C$$

и, следовательно, в соответствии с (13)

$$\sigma_r = \frac{pAK}{1+\lambda} r^\lambda + \frac{1}{r} C.$$

При условии $r = r_{kp}$, $\sigma_r = 0$ получим

$$C = -\frac{pAK}{1+\lambda} r_{kp}^{1+\lambda}.$$

Тогда радиальные напряжения будут определяться как

$$\sigma_r = \frac{pAK}{1+\lambda} \left[1 - \left(\frac{r_{kp}}{r} \right)^{1+\lambda} \right] r^\lambda, \quad (14)$$

а окружные напряжения – формулой (10).

В соответствии с видом процесса принимаются значения константы p . По выражениям (10) и (14) можно рассчитывать напряжения на любом из этапов операции при известном положении края заготовки r_{kp} .

Сила операции при этом

$$P = 2\pi r_1 \delta \sigma_r = \frac{2\pi A p k^{m+n} \psi^\eta}{1+\lambda} \delta_0 r_1^{1+\lambda+n f} \left(\frac{r_0}{r_{kp}} \right)^{1-f} V_n^n \left(\ln \frac{r_0}{r_{kp}} \right)^m \left[\pm 1 \mp \left(\frac{r_{kp}}{r_1} \right)^{1+\lambda} \right]. \quad (15)$$

С другой стороны, энергетический метод расчета дает возможность поэтапной оценки силы в зависимости от положения края полуфабриката на текущий момент. Величина силы определяется в соответствии с экстремальной теоремой пластичности интегралом

$$P \leq \frac{1}{V_n} \int \int \sigma_e \xi_e \delta r d\varphi dr.$$

Подставляя входящие выражения, будем иметь

$$P \leq \frac{2\pi A k^{1+m+n} \psi^\eta}{2 - (1+n)(1+f)} \delta_0 r_1^{1-n} \left(\frac{r_0}{r_{kp}}\right)^{1-f} V_n^n \left(\left|\ln \frac{r_0}{r_{kp}}\right|\right)^m \times \left[1 + \left(\frac{r_{kp}}{r_1}\right)^{2-(1+n)(1+f)}\right]. \quad (16)$$

В результате из выражений (15) и (16) видно, что значение силы зависит от величин степеней деформации, скоростей операций и анизотропии исходного материала.

Процесс формоизменения заготовки сопровождается потерей сплошности материала, что определяет ограничения на скоростные и деформационные режимы операций.

Сплошность заготовки будем оценивать по энергетической и деформационной теориям прочности и ползучести для вязкопластичного материала. Механическое состояние формоизменяемой заготовки выражается соотношением (7), т.е.

$$\sigma_e = A \psi^\eta \varepsilon_e^m \xi_e^n, \quad (17)$$

где A, η, m, n – константы уравнения состояния.

Записываем величину сплошности в соответствии с приведенными теориями прочности в виде

$$d\psi = -\frac{1}{A_{пр}} \sigma_e \xi_e dt, \quad (18)$$

$$d\psi = -\frac{\xi_e}{(\varepsilon_e)_{пр}} dt, \quad (19)$$

где сплошность $1 \geq \psi \geq 0$ при $0 \leq t \leq t_{kp}$; t_{kp} – критическое время, определяющее возможное разрушение материала заготовки; $A_{пр}$, $(\varepsilon_e)_{пр}$ – предельная удельная работа разрушения и предельная эквивалентная деформация соответственно. Если проводить оценку сплошности в точках максимальных деформаций, т.е. в краевых свободных точках заготовки, то в соответствии с уравнениями (3) и (4)

$$\xi_e = k V_n r_1^f r_{кр.т.}^{-1-f}; \quad (20)$$

$$\varepsilon_e = k \left| \ln \frac{r_0}{r_{кр.т.}} \right|; \quad (21)$$

$r_{кр.т.}$ – текущий радиус формоизменяемого края заготовки; r_0 – первоначальный радиус отверстия.

Вносим в уравнение (18) выражения (17), (20) и (21). Учитывая, что

$$dt = \frac{dr}{V_r} = \frac{r_{кр.т.} dr_{кр.т.}}{V_r r_1^f},$$

получаем

$$\psi = \left[1 - (1 - \eta) V_n^n P \right]^{1 - \eta} \quad (22)$$

при $\eta \neq 1$ и

$$\psi = \exp(P V_n^n) \quad (23)$$

при $\eta = 1$.

Здесь

$$P = \frac{A k^{1+m+n}}{A_{пр} r_1^{-nf}} \left| \int_{r_1}^{r_2} r_{кр.т.}^{-1-n(1+f)} \ln \frac{r_0}{r_{кр.т.}} \right|^m dr_{кр.т.}$$

Связываемое с возможным разрушением заготовки критическое состояние соответствует условию $\psi = 0$. Из выражений (22), (23) вытекает взаимосвязь скорости операции и размеров заготовок и изделий в виде

$$V_n = [(1 - \eta) P]^{-1/n}; \quad (24)$$

$$V_n = P^{-\frac{1}{n}}. \quad (25)$$

Расчетные величины сплошности материала и критические условия операции в соответствии с энергетической теорией определяются зависимостями (22) – (25).

С учетом уравнения (19) сплошность по деформационной теории

$$\psi = 1 - \frac{k}{(1 - f)(\epsilon_e)_{пр}} \left| r_2^{1-f} - r_1^{1-f} \right| \quad (26)$$

и критическое состояние наступает при

$$r_1 = \left[r_2^{1-f} \pm \frac{1-f}{k} (\epsilon_e)_{пр} \right]^{\frac{1}{1-f}} \quad (27)$$

не зависимо от скорости операции.

Приближенно можно провести оценку сплошности формоизменяемого материала заготовки, используя выражение для конечных эквивалентных деформаций в краевых точках изделия. Здесь

$$\epsilon_e = k \left| \ln \frac{r_1}{r_2} \right|. \quad (28)$$

Эквивалентные скорости деформации усреднены, и время в этой связи

$$\xi_e = \frac{\varepsilon_e}{t}, \quad t = \frac{\Delta h}{V_n}, \quad dt = \frac{1}{V_n} d(\Delta h). \quad (29)$$

В соответствии с энергетической теорией прочности (18), учитывая (28), (29) и уравнение состояния (17), получаем

$$\psi = \left[1 - (1 - \eta)V_n^n K \right]^{\frac{1}{1-\eta}} \quad (30)$$

при $\eta \neq 1$ и

$$\psi = \exp(KV_n^n) \quad (31)$$

при $\eta = 1$.

Здесь

$$K = \frac{A(\Delta h)^{-n}}{nA_{\text{пр}}} \left(k \left| \ln \frac{r_1}{r_2} \right| \right)^{1+m+n}.$$

Аналогично соотношениям (24), (25) определяется критическое состояние

$$V_n = [(1 - \eta)K]^{-1/n}, \quad (32)$$

$$V_n = K^{-\frac{1}{n}}. \quad (33)$$

В соответствии с кинетической теорией прочности (19)

$$\psi = 1 - \frac{\varepsilon_e}{(\varepsilon_e)_{\text{пр}}} = 1 - \frac{k \left| \ln \frac{r_1}{r_2} \right|}{(\varepsilon_e)_{\text{пр}}}. \quad (34)$$

Отсюда вытекает выражение для критических параметров формоизменения

$$\frac{r_1}{r_2} = \exp\left(\frac{1}{k}(\varepsilon_e)_{\text{пр}}\right). \quad (35)$$

Константы во всех представленных выражениях находятся при условии известного среднего напряжения. Поскольку в краевых точках формоизменяемой области заготовки $\varepsilon_e = \max$, $\sigma_r = \sigma_z = 0$, то, учитывая условие (10), среднее напряжение

$$\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_\varphi + \sigma_z) = \frac{1}{3}\sigma_\varphi = \frac{1}{3}p\sigma_e.$$

Из зависимостей [1] следуют выражения для предельной работы разрушения и предельной эквивалентной деформации, т.е.

$$A_{\text{пр}} = c_1 \exp\left(\frac{1}{3}pA_1\right), \quad (\varepsilon_e)_{\text{пр}} = c_2 \exp\left(\frac{1}{3}pA_2\right),$$

где A_1 , A_2 , c_1 , c_2 – константы, полученные на основе экспериментальных данных.

Представленные выражения можно использовать для оценки кинематики течения, напряженного и деформированного состояния, потери сплошности материала анизотропной заготовки, силовых режимов изотермической отбортовки в условиях вязкопластического течения.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 15-48-03234 р_центр, № 14-08-00066 а и 16-38-00082 мол_а.

Список литературы

1. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, В.И. Трегубов, А.В. Черняев. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.
2. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.
3. Романов К.И. Механика горячего формоизменения. М.: Машиностроение. 1993. 240 с.
4. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: УПИ, 2001. 836 с.
5. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

Чудин Владимир Николаевич, д-р техн. наук, проф., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Москва, Институт путей сообщения,

Пасынков Андрей Александрович, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Нуждин Георгий Анатольевич, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Москва, Орган по сертификации систем качества «Консерсиум»

ISOTHERMAL FLANGING BLANKS ANISOTROPIC MATERIALS MODE VISCOUS-PLASTIC

V.N. Chudin, A.A. Pasyнков, G.A. Nuzhdin

The article considers the anisotropic isothermal flanging workpieces in a viscoplastic material flow. Stress state assumed flat. The flow of material - radial, workpiece material - transversely isotropic. The expressions for the evaluation of power and modes of damage. The evaluation was performed by the continuity of the energy and the deformation theory of strength and creep for visco-plastic material.

Key words: viscous-plastic state, pressure, continuity, creep, transversely isotropic materials.

Chudin Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Moscow, Moskow State University of Ways of communications,

Pasynkov Andrey Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Nuzhdin Georgiy Anatolievich, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Moscow, Organ by Quality System Certification "Konsersium"

УДК 621.983; 539.374

ОЦЕНКА КОМПОНЕНТ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ КОНИЧЕСКИМ РОЛИКОМ

К.С. Ремнев, В.И. Трегубов, Е.В. Осипова

Рассмотрена схема взаимодействия деформирующего конического ролика с материалом заготовки при ротационной вытяжке деталей тремя роликами. Получены выражения для определения геометрических параметров заготовки, инструмента и величины подачи. Получены соотношения, позволяющие аналитически оценить величины компонент скоростей деформации в локальном очаге деформации при ротационной вытяжке цилиндрических деталей коническим роликом.

Ключевые слова: ротационная вытяжка, очаг деформации, подача, заготовка, ролик.

Ролики имеют различные углы рабочего конуса, устанавливаются с различной величиной зазора от оправки, имеют радиальное смещение относительно друг друга и установлены в одной плоскости. Необходимым условием является установка наибольшего зазора для ролика с наименьшим углом, а зазор, равный толщине стенки готовой детали на обрабатываемом участке устанавливается для ролика, имеющего наибольший угол в комплекте из трех.

Такая установка деформирующих роликов при ротационной вытяжке приводит к образованию трех последовательно расположенных неразрывных участка деформации, наклоненных к оси заготовки под различными углами. Расположение очагов деформации таким образом позволит ограничить образование напłyва и обеспечить более высокую точность диаметральных размеров изготавливаемых деталей.

Для обозначения роликов введем индекс $i = 1; 2; 3$.

Геометрия каждого из трех роликов характеризуется радиусом R_p ($D_p = 2R_p$) и углом конусности α_{pi} .

Геометрию заготовки, в свою очередь, будем определять радиусом (диаметром) на входе в каждый из трех очагов пластической деформации R_{gi} ($D_{gi} = 2R_{gi}$) и толщиной стенки t_{0i} .

Геометрию детали (полуфабриката) определим радиусом (диаметром) R_{di} ($D_{di} = 2R_{di}$) и толщиной t_{ki} . Геометрию оснастки будем определять радиусом (диаметром) оправки – r_o ($d_o = 2r_o$).

Каждый из трех роликов за один оборот заготовки переместится на величину рабочей подачи S .

Положим, что вдоль оси заготовки реализуется плоская деформация, тогда недеформированная часть заготовки при подаче суппорта перемещается вдоль оси на величину $S' = S(t_{0i} - t_{ki})/t_{0i}$.

В результате можно определить величину фактической подачи S_{ϕ} материала заготовки в очаг деформации $S_{\phi} = S - S' = S \frac{t_{ki}}{t_{0i}}$.

Используя схему на рис. 1, можно определить максимальный угол контакта ролика с заготовкой.

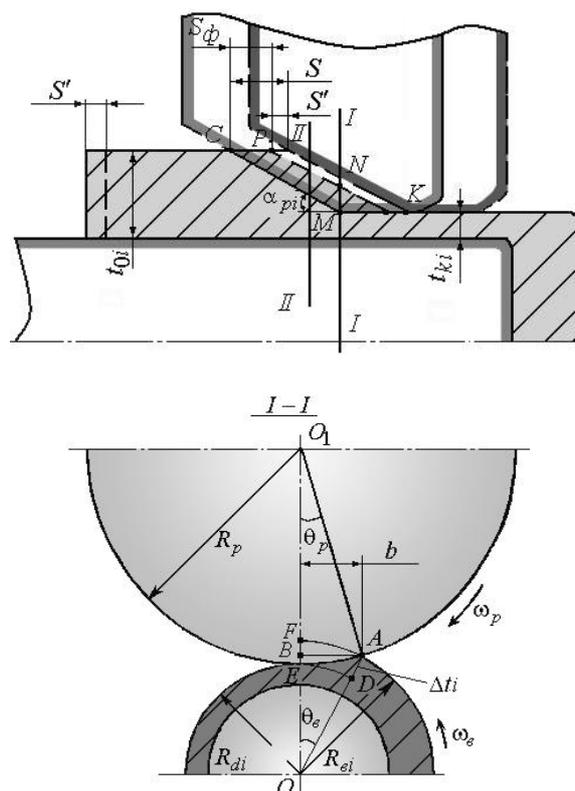


Рис. 1. Схема очага деформации при ротационной вытяжке

Введем обозначение: ρ – радиус точки ролика на конической его части, которая первая касается поверхности заготовки. Данная точка будет находиться на границе раздела жесткой и пластической областей. Для представленной схемы справедливы соотношения

$$\rho_i \sin \theta_{pi} = R_{\delta i} \sin \theta_{\delta}; \quad (1)$$

$$\rho_i \cos \theta_{pi} + R_{\delta i} \cos \theta_{\delta} = R_p + R_{\delta i} - \Delta t_i. \quad (2)$$

Также используем выражение, связывающее тригонометрические функции

$$\cos^2 \theta_{pi} + \sin^2 \theta_{pi} = 1, \quad (3)$$

Из полученных выражений (1) – (3) выразим функцию $\rho_i = \rho_i(\theta_{\delta})$:

$$\begin{aligned} \rho_i^2 - R_{\delta i}^2 \sin^2 \theta_{\delta} = R_p^2 + R_{\delta i}^2 (1 - \cos \theta_{\delta})^2 + \Delta t_i^2 + 2R_p R_{\delta i} (1 - \cos \theta_{\delta}) - \\ - 2R_p \Delta t_i - 2R_{\delta i} (1 - \cos \theta_{\delta}) \Delta t_i. \end{aligned} \quad (4)$$

Принимая во внимание малость угла θ_{δ} , выражение (4) можно упростить до следующего вида:

$$\rho_i^2 - (R_p - \Delta t_i)^2 = \theta_{\delta}^2 (R_{\delta i}^2 + R_p R_{\delta i} - R_{\delta i} \Delta t_i). \quad (5)$$

Из выражения (5) можно выразить угол $\theta_{\delta i}$:

$$\theta_{\delta} = \left(\frac{\rho_i^2 - (R_p - \Delta t_i)^2}{R_{\delta i} (R_{\delta i} + R_p - \Delta t_i)} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

В рассматриваемой схеме ролики конические с углами конусности α_{pi} , радиусы закругления отсутствуют (рис. 2).

Для данной схемы справедливо

$$\rho_i = R_p + S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi} - \Delta t_i \text{ для случая } S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi} \leq \Delta t_i; \quad (7)$$

$$\rho_i = R_p \text{ для случая } S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi} \geq \Delta t_i. \quad (8)$$

Используем данные выражения для определения угла θ_{δ} при этом учтем, что величины Δt_i и S_{ϕ} ничтожно малы по сравнению с радиусом ролика. Тогда

$$\theta_{\delta} = \left[\frac{2S_{\phi} R_p \operatorname{tg} \alpha_{pi}}{R_{\delta i} (R_{\delta i} + R_p)} \right]^{1/2} \text{ для случая } S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi} \leq \Delta t_i; \quad (9)$$

$$\theta_{\delta} = \left[\frac{2R_p \Delta t_i}{R_{\delta i} (R_{\delta i} + R_p)} \right]^{1/2} \text{ для случая } S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi} \geq \Delta t_i. \quad (10)$$

Таким образом, на величину угла θ_{δ} влияет значение фактической подачи S_{ϕ} , изменение толщины стенки детали Δt_i , радиус роликов R_p , радиусы заготовки $R_{\delta i}$, а также углы конусности роликов α_{pi} .

Максимальную протяженность контакта каждого ролика с заготовкой в осевом направлении l_i можно определить следующим образом:

$$l_i = \Delta t_i \operatorname{ctg} \alpha_{pi} + S_{\phi}. \quad (11)$$

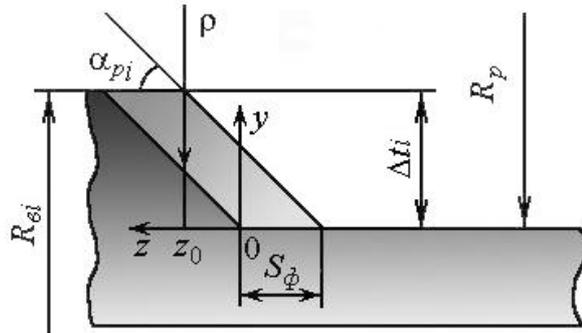


Рис. 2. Конический ролик ($y = z \operatorname{tg} \alpha_{pi}$)

Поворот оправки на угол θ_e соответствует промежутку времени, когда протекает пластическая деформация под роликами. В этот момент материал заготовки течет под роликами в осевом направлении.

Следует отметить, что угол контакта материала заготовки с роликом изменяется по длине очага деформации. В каждом сечении возможно определить ширину зоны контакта

$$b_i = R_p \sin \theta_{pi}, \quad (12)$$

Здесь θ_{pi} – угол контакта металла заготовки с i -м роликом в соответствующем сечении очага деформации. Проекция очага деформаций в тангенциальном и радиальном направлениях при условии $S_\phi < \Delta t_i \operatorname{tg} \alpha_{pi}$ имеют вид, показанный на рис. 3.

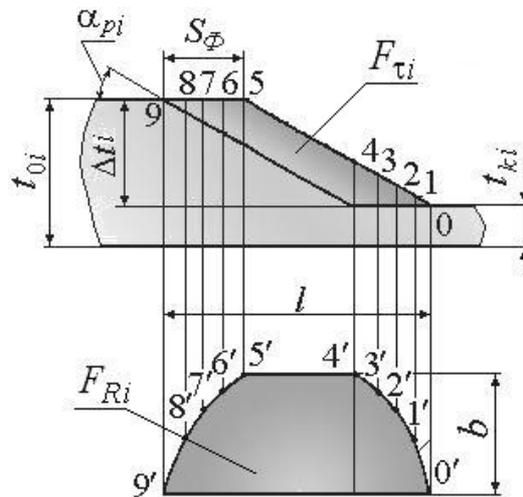


Рис. 3. Проекция очага деформации в тангенциальном и радиальном направлениях ($S_\phi < \Delta t_i \operatorname{tg} \alpha_{pi}$)

Рассматривая сечение заготовки, проведенное под углом θ к линии центров, можно определить скорость вдавливания каждого ролика в заготовку [1]:

$$V_{ri} = R_{oi} \theta (\omega_{pi} + \omega_e), \quad (13)$$

где ω_{pi} и ω_{ϵ} – угловые скорости ролика и заготовки соответственно; $\omega_{\epsilon} = 2\pi n$; n – частота вращения шпинделя.

Угловая скорость i -го ролика определяется по выражению

$$\omega_{pi} = \omega_{\epsilon} R_{\epsilon i} / R_p.$$

Рассмотрим заготовку в зоне контакта ролика и металла в цилиндрической системе координат r, θ, z , при этом радиальную составляющую скорости каждого ролика определим как

$$V_{rki} = V_{ri} \cos \theta. \quad (14)$$

Далее в сечении $z = const$ определим уравнение линии контакта.

Из треугольника ABC (рис. 4)

$$c_i = \frac{a \sin C}{\sin A} = \frac{(\rho'_i + R_{\epsilon i} - \Delta t_i + z \operatorname{tg} \alpha_{pi}) \sin \psi}{\sin(\pi - \psi - \theta)} = \frac{(\rho'_i + R'_{di}) \sin \psi}{\sin(\pi - \psi - \theta)}. \quad (15)$$

Здесь

$$\rho'_i = R_p - z \operatorname{tg} \alpha_{pi}; \quad R'_d = R_{\epsilon i} - \Delta t_i + z \operatorname{tg} \alpha_{pi}.$$

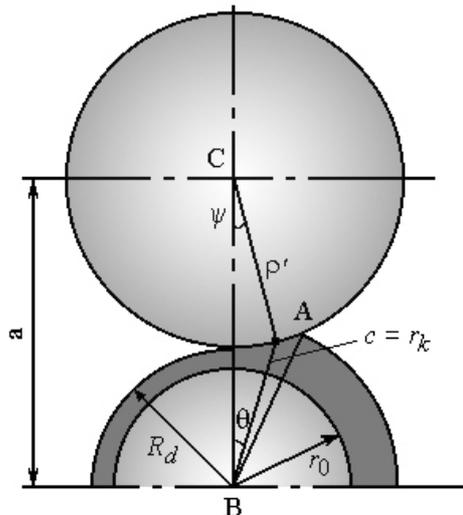


Рис. 4. Определение радиуса контактной поверхности ролика и заготовки в плоскости $z = const$

Поскольку

$$\sin \psi = \frac{r_{ki}}{\rho'_i} \sin \theta, \quad (16)$$

то радиус контактной поверхности в цилиндрической системе координат в плоскости $z = const$ представим в виде выражения

$$r_{ki} = \frac{(R_p + R_{\epsilon i} - \Delta t_i) r_{ki} \sin \theta}{(R_p - z \operatorname{tg} \alpha_{pi}) \sin \left[\theta + \arcsin \left(\frac{r_{ki}}{R_p - z \operatorname{tg} \alpha_{pi}} \sin \theta \right) \right]}. \quad (17)$$

Преобразуем выражение (17):

$$\sin \left[\theta + \arcsin \left(\frac{r_{ki}}{R_p - z \operatorname{tg} \alpha_{pi}} \sin \theta \right) \right] = \frac{R_p + R_{ei} - \Delta t_i}{R_p - z \operatorname{tg} \alpha_{pi}} \sin \theta;$$

$$\sqrt{1 - \frac{r_{ki}^2}{(R_p - z \operatorname{tg} \alpha_{pi})^2} \sin^2 \theta} + \cos \theta \frac{r_{ki}}{R_p - z \operatorname{tg} \alpha_{pi}} = \frac{R_p + R_{ei} - \Delta t_i}{R_p - z \operatorname{tg} \alpha_{pi}}.$$

В силу того, что величина $\frac{r_{ki}^2}{(R_p - z \operatorname{tg} \alpha_{pi})^2} \sin^2 \theta$ значительно меньше 1, ею можно пренебречь. В результате получим

$$\frac{R_p + R_{ei} - \Delta t_i}{R_p - z \operatorname{tg} \alpha_{pi}} - 1 = \frac{r_{ki} \cos \theta}{R_p - z \operatorname{tg} \alpha_{pi}}$$

или

$$r_{ki} = (R_{ei} - \Delta t_i + z \operatorname{tg} \alpha_{pi}) / \cos \theta. \quad (18)$$

Изменение скорости V_{ri} в пластической области можно определить таким образом:

$$V_{ri} = -V_{rki} \frac{r - r_0}{r_{ki} - r_0}, \quad (19)$$

где r_0 – радиус оправки; r_{ki} – радиус контактной поверхности каждого ролика и заготовки.

Принимая во внимание соотношение (13), получим

$$V_{ri} = -R_{ei} \theta (\omega_p + \omega_e) \cos \theta \frac{r - r_0}{r_{ki} - r_0}. \quad (20)$$

По схеме очага деформации (рис. 1) определим

$$R_{ei} = R_{di} + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi}; \quad \Delta t_i = S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi}; \quad r_{ki} = \frac{R_{di} + z \operatorname{tg} \alpha_{pi}}{\cos \theta},$$

в результате

$$V_{ri} = -(R_{di} + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi}) \theta (\omega_p + \omega_e) \times$$

$$\times \frac{r - r_0}{R_d + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} - r_0 \cdot \cos \theta} \cos^2 \theta. \quad (21)$$

Далее определим тангенциальную составляющую скорости $V_{\theta i}$.

Для случая обобщенного плоского деформированного состояния ($\xi_{\theta i} = 0$, $\xi_{r\theta i} \neq 0$ и $\xi_{z\theta i} \neq 0$) будем иметь

$$\frac{1}{r} \frac{\partial V_{\theta i}}{\partial \theta} + \frac{V_{ri}}{r} = 0; \quad \frac{\partial V_{\theta i}}{\partial \theta} = -V_{ri}. \quad (22)$$

В результате $V_{\theta i}$ можно определить как

$$V_{\theta i} = (\omega_p + \omega_e)(R_{di} + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi})(r - r_0) \times \\ \times \int_0^{\theta} \frac{\theta \cos^2 \theta d\theta}{R_{di} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} - r_0 \cos \theta} + F_1(r, z). \quad (23)$$

Используем граничные условия:
при $\theta = 0$

$$V_{\theta i} = F(r, 0) = -\omega_e r. \quad (24)$$

Окончательное выражение для вычисления тангенциальной составляющей скорости принимает вид

$$V_{\theta i} = -\omega_e r + (\omega_{pi} + \omega_e)(R_d + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi})(r - r_0) \times \\ \times \int_0^{\theta} \frac{\theta \cos^2 \theta d\theta}{R_{di} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} - r_0 \cos \theta}. \quad (25)$$

Для определения скорости течения материала необходимо идеализировать сечение заготовки и ролика с образующим углом α_{pi} и нулевым радиусом закругления (рис. 5). Положим, что в момент, когда расстояние между поверхностью ролика и детали

$$t_{i1} = t_k + S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi}, \quad (26)$$

начинается истечение материала.

Принимая условие плоской деформации, когда площади заштрихованных областей равны между собой, получим

$$t_i x_{2i} = (t_0 - t_i) \delta_i \operatorname{ctg} \alpha_{pi}. \quad (27)$$

Исходя из равенства скоростей потоков областей, имеем

$$V_{Ri}(x_{1i} + x_{2i}) = V_{zi} t_i, \quad (28)$$

где V_{Ri} и V_{zi} – скорость вдавливания и скорость осевого течения.

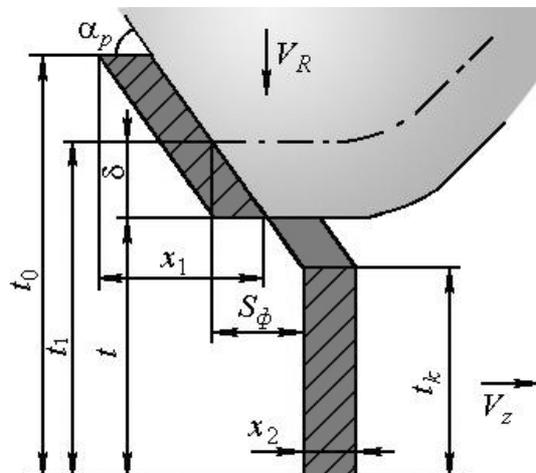


Рис. 5. Идеализированное сечение заготовки и ролика при определении скорости течения

Из (28) определим скорость осевого течения

$$V_{zi} = V_{Ri} \frac{x_{1i} + x_{2i}}{t_i}. \quad (29)$$

Используя схему на рис. 5, выразим

$$x_{1i} = (t_0 - t_i + \delta_i) \operatorname{ctg} \alpha_{pi} = (t_0 - 2t_i + t_k + S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi}) \operatorname{ctg} \alpha_{pi};$$

$$x_{2i} = \frac{t_0 - t_i}{t_i} (t_k + S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi} - t_i) \operatorname{ctg} \alpha_{pi};$$

$$x_{1i} + x_{2i} = \frac{t_0 t_{ki} + t_0 S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi} - t_i^2}{t_i} \operatorname{ctg} \alpha_{pi}.$$

Используем соотношение (29), запишем

$$V_{zi} = V_{Ri} \frac{x_{1i} + x_{2i}}{t_i} = V_{Ri} \left[\frac{t_0}{t_i^2} (t_{ki} + S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi}) - 1 \right] \operatorname{ctg} \alpha_{pi}. \quad (30)$$

При дальнейших расчетах можно принять, что местная толщина стенки t_i заготовки изменяется по дуге контакта по следующей зависимости:

$$t_i = t_{ki} + (t_{0\text{мек}} - t_{ki}) \frac{\theta}{\theta_e}. \quad (31)$$

Используя условие несжимаемости

$$\xi_{zi} = -\xi_{ri} \quad \text{или} \quad \frac{\partial V_{zi}}{\partial z} = -\frac{\partial V_{ri}}{\partial r}, \quad (32)$$

а также принимая во внимание, что

$$\xi_{ri} = \frac{\partial V_{ri}}{\partial r} = -\theta (\omega_p + \omega_{ei}) \frac{R_{di} + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi}}{R_{di} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} - r_0 \cdot \cos \theta} \cos^2 \theta, \quad (33)$$

выражение для определения осевой составляющей скорости будет иметь вид

$$V_{zi} = \theta (\omega_p + \omega_{ei}) \cos^2 \theta \int_0^z \frac{R_{di} + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi}}{R_{di} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} - r_0 \cdot \cos \theta} dz + F_2(r, \theta). \quad (34)$$

Используя условие, что начало истечения материала происходит при расстоянии между поверхностью ролика и заготовки, равном $t_i = t_k + S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi}$ в сечении $z = 0$, определим функцию $F_2(r, \theta)$:

$$V_{zi} = F_2(r, 0) = -R_{ei} \theta (\omega_p + \omega_{ei}) \operatorname{ctg} \alpha_{pi} \left[\frac{t_0 (t_{ki} + S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi})}{t_i^2} - 1 \right], \quad (35)$$

где

$$t_i = t_{ki} + (t_{0\text{мек}} - t_{ki}) \frac{\theta}{\theta_e}; \quad t_{0\text{мек}} = t_{ki} + S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi}; \quad R_{ei} = R_{di} + S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi}.$$

В результате осевая составляющая скорости V_{zi} определяется по выражению

$$V_{zi} = \theta (\omega_p + \omega_{\theta i}) \cos^2 \theta \int_0^z \frac{R_{di} + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi}}{R_{di} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} - r_0 \cdot \cos \theta} dz - R_{\theta i} \theta (\omega_p + \omega_{\theta i}) \operatorname{ctg} \alpha_{pi} \left[\frac{t_0 (t_{ki} + S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi})}{t_i^2} - 1 \right]. \quad (36)$$

Запишем выражения для определения компонент скоростей деформации в цилиндрической системе координат [3]:

$$\xi_{ri} = \frac{\partial V_{ri}}{\partial r}; \quad \xi_{\theta i} = \frac{1}{r} \frac{\partial V_{\theta i}}{\partial \theta} + \frac{V_{ri}}{r}; \quad \xi_{zi} = \frac{\partial V_{zi}}{\partial z} = -\xi_{ri} - \xi_{\theta i};$$

$$\xi_{r\theta i} = \frac{\partial V_{\theta i}}{\partial r} - \frac{V_{\theta i}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{ri}}{\partial \theta}; \quad \xi_{\theta zi} = \frac{1}{r} \frac{\partial V_{zi}}{\partial \theta} + \frac{\partial V_{\theta i}}{\partial z}; \quad \xi_{rzi} = \frac{\partial V_{ri}}{\partial z} + \frac{\partial V_{zi}}{\partial r}. \quad (37)$$

Выражения для определения радиальной составляющей скорости V_{ri} можно упростить, учитывая малость угла θ :

$$V_{ri} = -(R_{di} + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi}) \theta (\omega_p + \omega_{\theta i}) \frac{r - r_0}{R_{di} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} - r_0}. \quad (38)$$

В результате можно вычислить тангенциальную V_{θ} и осевую V_{zi} составляющие скоростей течения материала в очаге пластической деформации:

$$V_{\theta i} = (\omega_p + \omega_{\theta i}) \frac{R_{di} + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi}}{R_{di} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} - r_0} (r - r_0) \frac{\theta^2}{2} - \omega_{\theta i} r; \quad (39)$$

$$V_{zi} = \theta (\omega_p + \omega_{\theta i}) \left\{ z + (S_{\phi} + r_0 \operatorname{ctg} \alpha_{pi}) \ln \frac{z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + R_{di} - r_0}{R_{di} - r_0} - R_{\theta i} \operatorname{ctg} \alpha_{pi} \left(\frac{[t_0 (t_{ki} + S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi})]}{[(t_{ki} + (t_0 - t_k) \frac{\theta}{\theta_e})^2] - 1} \right) \right\}. \quad (40)$$

Используя (38, 39 и 40), а также условие несжимаемости материала, определим компоненты скоростей деформации по выражениям (37):

$$\xi_{ri} = \frac{\partial V_{ri}}{\partial r} = -\theta (\omega_p + \omega_{\theta i}) \frac{R_{di} + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi}}{R_{di} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} - r_0}; \quad \xi_{\theta i} = 0;$$

$$\xi_{zi} = -\xi_{ri} = \theta (\omega_p + \omega_{\theta i}) \frac{R_{di} + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi}}{R_{di} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} - r_0};$$

$$\begin{aligned} \xi_{r\theta i} &= \frac{\partial V_{\theta i}}{\partial r} - \frac{V_{\theta i}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{ri}}{\partial \theta} = \\ &= (\omega_p + \omega_{\theta i}) \frac{R_{di} + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi}}{R_{di} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} - r_0} \left[\frac{r_0}{r} \left(1 + \frac{\theta^2}{2} \right) - 1 \right] - \omega_{\theta i}; \\ \xi_{\theta z i} &= \frac{1}{r} \frac{\partial V_{zi}}{\partial \theta} + \frac{\partial V_{\theta i}}{\partial z} = \\ &= \frac{1}{r} (\omega_p + \omega_{\theta i}) \left\{ z + (S_{\phi} + r_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{pi}) \cdot \ln \frac{z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + R_{di} - r_0}{R_{di} - r_0} - \right. \\ &\quad \left. - R_{\theta i} \operatorname{ctg} \alpha_{pi} \left(\frac{[t_0(t_{ki} + S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi})]}{[(t_{ki} + (t_0 - t_{ki}) \frac{\theta}{\theta_e})^2] - 1} \right) \right\} + \\ &\quad + \frac{1}{r} \theta (\omega_p + \omega_{\theta i}) \left\{ z + (S_{\phi} + r_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{pi}) \cdot \ln \frac{z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} + R_{di} - r_0}{R_{di} - r_0} + \right. \\ &\quad \left. + 2 R_{\theta i} \operatorname{ctg} \alpha_{pi} \frac{t_0(t_{ki} + S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_{pi})(t_0 - t_{ki})}{[t_{ki} + (t_0 - t_{ki}) \cdot (\theta / \theta_e)]^3 \theta_e} \right\} - \\ &\quad - (\omega_p + \omega_{\theta i})(r - r_0) \frac{\theta^2}{2} \operatorname{tg} \alpha_{pi} \frac{r_0 + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi}}{(R_{di} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} - r_0)^2}; \\ \xi_{rz i} &= \frac{\partial V_{ri}}{\partial z} + \frac{\partial V_{zi}}{\partial r} = \theta (\omega_p + \omega_z)(r - r_0) \operatorname{tg} \alpha_{pi} \frac{r_0 + S_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi}}{(R_{di} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_{pi} - r_0)^2}. \end{aligned}$$

Приведенные выше соотношения позволяют аналитически (приближенно) оценить величины компонент скоростей деформации в локальном очаге деформации при ротационной вытяжке цилиндрических деталей коническими роликами.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 15-48-03235.

Список литературы

1. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Яковлев С.П. Ротационная вытяжка с утонением стенки осесимметричных деталей из анизотропных трубных заготовок на специализированном оборудовании. М.: Машиностроение, 2009. 265 с.
2. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Ротационная вытяжка с утонением стенки трубных заготовок из анизотропного материала // Кузнечно-штамповочное производство. 2011. № 12. С. 10-17.
3. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: УГТУ, 2001. 836 с.

Ремнев Кирилл Сергеевич, д-р техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Трегубов Виктор Иванович, д-р техн. наук, проф., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Осипова Елена Витальевна, вед. инженер, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, АО «НПО «СПЛАВ»

**EVALUATION COMPONENT OF THE STRAIN RATE
IN THE DEFORMATION AT ROTARY DRAWING OF CYLINDRICAL PARTS OF
TAPERED ROLLERS**

K.S. Remnev, V.I. Tregubov, E.V. Osipova

In the article the scheme of interaction of deforming the tapered roller to the workpiece material for rotary drawing parts three rollers. Expressions for definition of geometrical parameters of the workpiece, the tool and the supply amount. Relationships allow analytically assess the amount of deformation velocity component in the local deformation zone with a rotating cylindrical parts drawing tapered roller.

Key words: rotary extractor, deformation zone, supply, storage, roller.

Remnev Kirill Sergeevich, doctor of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Tregubov Victor Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Osipova Elena Vitalievna, postgraduate, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, JSC SPA «SPLAV»

ВОЕННО-СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ

УДК 623.445.1

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗАЩИТНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ БРОНЕЗАЩИТЫ

С.Н. Курков, С.А. Куканов, Ю.М. Зайцев

Рассматривается возможность применения покрытия защитного элемента общевойскового бронежилета из полимерных нанокompозитных материалов с добавкой углеродных нанотрубок. Рассмотрен механизм воздействия на сердце бойца, экипированного общевойсковым бронежилетом с защитным элементом с покрытием из полимера марки «Виксинт ПК-68» с добавлением углеродных нанотрубок марки «Деалтом» при процентных соотношениях 0,5 % и выше.

Ключевые слова: общевойсковой бронежилет, полимерный нанокompозитный материал, углеродные нанотрубки, закрытая контузионная травма, высокочастотный и низкочастотный импульсы, ударное давление.

Анализ опыта применения общевойсковых бронежилетов (ОБЖ) показывает, что выход из строя пехотинца наблюдается не только при пробитии поражающим элементом (ПЭ) защитной композиции ОБЖ, но и при условии ее непробития, вызывающего закрытую контузионную травму (ЗКТ). Поэтому вторым фактором, определяющим эффективность защиты ОБЖ, является ЗКТ, которую получает боец в бронежилете, когда в него попадает пуля или осколок.

Достижения современных нанотехнологий в получении полимерных композитов, сочетающих такие недостижимые в однородном материале свойства, как прочность, пластичность и эластичность, вызывают необходимость проведения исследований, направленных на определение возможности применения полимерных композитных материалов в практике броневой защиты ЖС.

В настоящее время углеродные нанотрубки (УНТ) являются одними из самых многообещающих материалов в области нанотехнологий [1].

Одним из путей совершенствования ОБЖ является применение конструкций защитных элементов (ЗЭ), содержащих покрытие из полимерных нанокompозитных материалов с добавкой УНТ.

Анализ отечественной [3], [4] и зарубежной литературы [5], [6] по проблеме ЗКТ позволяет утверждать, что при обстреле и непробитии защитной композиции за преградой образуется временная полость, порождаемая переданным импульсом давления.

Из представленных на рис. 1 экспериментальных данных видно, что в момент удара пули о бронежилет в мягких тканях бойца возникают два пика ударного давления P_1 и P_2 . Для первого пика характерны, во-первых, большая максимальная амплитуда $P_{m1} = 7288$ кПа, во-вторых, практически мгновенное ($\tau = 4$ мкс) нарастание давления P_{m1} до максимального и в-третьих, малая продолжительность во времени, составляющая порядка 0,1...1,0 мс. По данным многочисленных исследований [2], в это время развитие временной полости в подлежащих мягких тканях еще не происходит – фиксируются только взаимодействия пули с бронежилетом.

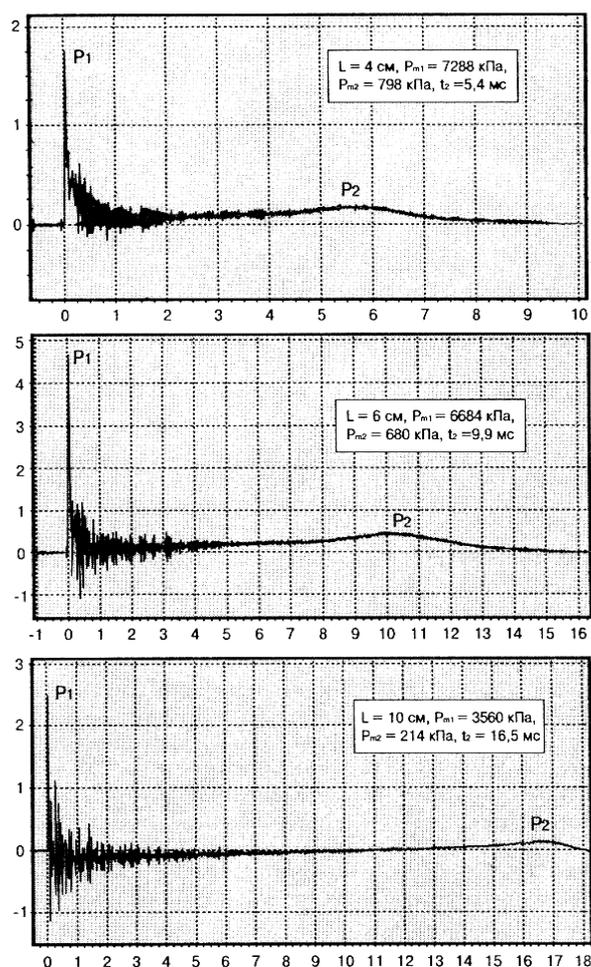


Рис. 1. Типовые осциллограммы кривых давлений в желатиновых блоках при обстреле и непробитии тканевого бронежилета из 9,0-мм пистолета ПМ

Практически сразу же после затухания первого пика имеет место развитие второго импульса ударного давления P_2 , во-первых, более низкочастотного, во-вторых, с существенно меньшей амплитудой P_{m2} , составляющей 798кПа, и, в-третьих, значительной продолжительностью (до 15 мс).

Во всех случаях имеют место возникновения двух импульсов ударного давления: первого – кратковременного, высокочастотного с большой амплитудой и второго – более продолжительного по времени, низкочастотного и с малой амплитудой. Однако единого и однозначного мнения о том, который из них определяет тяжесть ЗКТ, до сих пор не существует.

Поражающими факторами при непробитии бронежилета являются высокочастотный и низкочастотный импульсы ударного давления. Первый образуется от удара пули по бронежилету, второй – от удара бронежилета по мягким тканям человека. Для высокочастотного импульса максимальное давление составляет порядка 10000...20000 кПа, длительность – порядка 0,05...0,5 мс, частота спектра – 0,05...1,0 МГц. Для низкочастотного импульса максимальное давление составляет порядка 800...1200 кПа, длительность – порядка 5,0...15,0 мс, частота спектра – 50...300 Гц.

Высокочастотный импульс ударного давления приводит к патологии водителя сердечного ритма сердца [7]. Водитель сердечного ритма – участок сердечной мышцы, в котором генерируются импульсы, определяющие частоту сердечных сокращений. У человека в норме основным водителем ритма является синусно-предсердный узел (рис. 2) – особый участок на своде правого предсердия, расположенный у места впадения верхней поллой вены. Узел состоит из небольшого числа сердечных мышечных волокон, иннервированных окончаниями нейронов из вегетативной нервной системы. В узле зарождается каждая волна возбуждения, которая приводит к сокращению сердечной мышцы и служит стимулом для возникновения следующей волны. Возбуждающе-проводящая система сердца обеспечивает ритмичную работу сердечной мышцы, синхронизируя сокращения предсердий и желудочков. Высокочастотный импульс ударного давления разрушает синусно-предсердный узел на молекулярном уровне, что приводит к аритмии и полной остановке сердца [7].

Для защиты от высокочастотного импульса давления при непробитии бронежилета будем использовать композит на основе полимера с добавлением УНТ. Композит в полосе частот высокочастотного импульса обладает значительным поглощением волновой энергии (рис. 3).

Для описания защитных свойств композита на основе полимера с добавлением УНТ в ЗЭ ОБЖ будем использовать коэффициент прохождения волновой энергии, который определяется как $K_{пр} = E_{прош} / E_{пад}$, где

$E_{\text{прош}}$ – энергия прошедшей волны; $E_{\text{пад}}$ – энергия падающей волны. Коэффициент прохождения изменяется в пределах от 0 до 1. При $K_{\text{пр}} = 0$ полная защита, при $K_{\text{пр}} = 1$ нет защиты (вся волновая энергия проходит в мягкие ткани и органы человека).

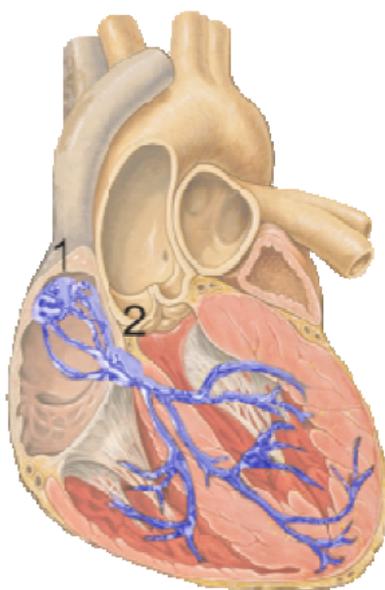


Рис. 2. Схематическое изображение проводящей системы сердца (выделено синим цветом): 1 - синусо-предсердный узел; 2 - предсердно-желудочковый узел

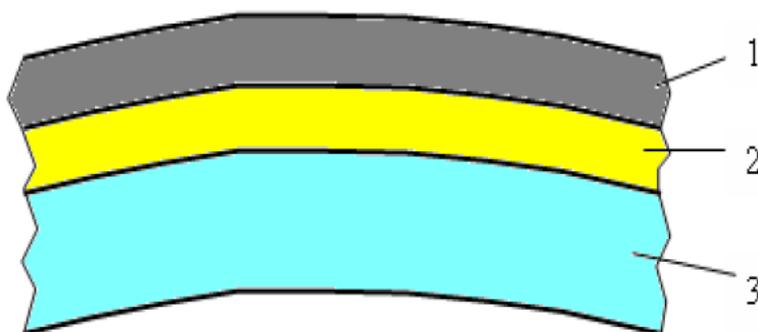


Рис. 3. Защитная композиция от высокочастотного импульса давления: 1 – бронезилет; 2 – подложка (полимер с добавлением УНТ); 3 – мягкие ткани человека

На рис. 4 показана зависимость коэффициента прохождения от спектральной плотности высокочастотного импульса ударного давления через композит на основе полимера с добавлением углеродных нанотрубок. Коэффициент прохождения $K_{\text{пр}} = I_{\text{прош}} / I_{\text{пад}}$, где $I_{\text{пад}}$ – интенсивность

падающей волны; $I_{\text{прош}}$ – интенсивность прошедшей волны. Интенсивность звука $I = \frac{1}{2} \text{Re}(P_m v_m)$, где P_m – амплитуда давления проходящей волны, v_m – амплитуда скорости частиц проходящей волны.

Ослабление высокочастотного импульса ударного давления существенно зависит от процентных соотношений массовых долей УНТ к полимеру. Чем больше это соотношение, тем значительней ослабление высокочастотного импульса. Полоса спектра высокочастотного импульса 0,05...1,0 МГц, в этой полосе ослабление соответственно составляет 45...64 дБ.

В бронежилетах используется в качестве климатически-амортизационной подложки (КАП) ударный пенополистирол. Для получения ослабления высокочастотного импульса до 45...64 дБ толщина ударного пенополистирола должна быть в два раз больше ($d = 20\text{мм}$) [8].

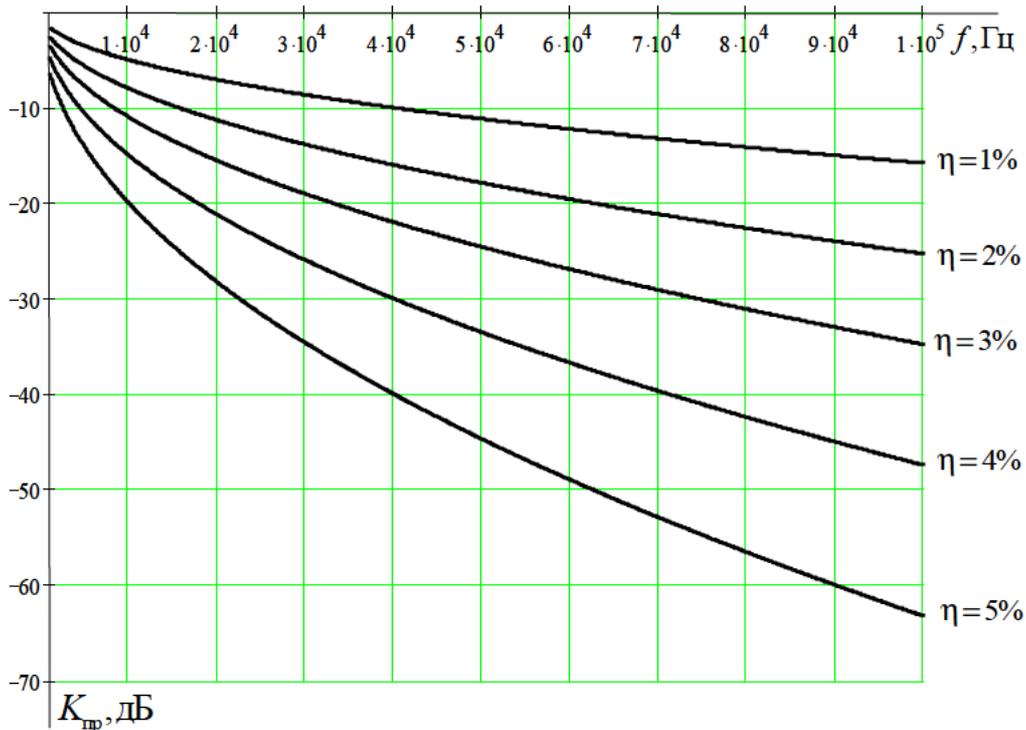


Рис. 4. Зависимость коэффициента прохождения волнового процесса через композит КАП на основе полимера с добавлением углеродных нанотрубок от частоты при различных процентных соотношениях массовых долей УНТ к полимеру: $d = 10\text{мм}$ – толщина подложки; полимер – Вискит ПК-68, углеродные нанотрубки – «Деалтом»

Таким образом, исходя из полученных результатов, перспективность использования композитов на основе полимеров с добавлением углеродных нанотрубок в конструкциях КАП для защиты мягких тканей бойца от

высокочастотного импульса ударного давления, возникающего при не пробитии ОБЖ, становится очевидной. Подана заявка на предполагаемое изобретение.

Список литературы

1. Наноматериалы, нанокompозиты, нанотехнологии / Н.А. Азаренков, В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, Л.В. Маликов, П.В. Турбин. Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. 209 с.
2. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. / В.И. Байдак [и др.]. М.: Изд-во «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003. 340 с.
3. Панов В.П. Оптимизация конструкции бронезиления для обеспечения безопасности личного состава (по результатам медико-экспериментальных исследований): дис.... канд. мед. наук. СПб., 2001. 126 с.
4. Тюрин М.В. Морфофункциональная характеристика тупой грудной клетки, защищенной бронезилением дис.... канд. мед. наук. Л., 1987. 146 с.
5. Gotts P.L. The Transfer of Momentum: A Suitable Measurement for Behind Armour Blunt Trauma? // Proceedings of Personal Armour Systems Symposium (PASS'98). Colchester. UK, 1998. P. 423 – 432.
6. van Bree, Nico van der Heider. Behind Armour Blunt Trauma. Analysis of Compression Waves // Proceedings of Personal Armour Systems Symposium (PASS'98). Colchester. UK, 1998. P. 433 – 440.
7. Klabunde R.E. Cardiovascular Physiology Concepts. Baltimore / Philadelphia: Wolter Kluwer / Lippincott, Williams and Wilkins, 2012. 256 p.
8. Тюмин А.А. Проблемные вопросы оценки эффективности осколочного действия боеприпасов по живой силе с учетом использования средств индивидуальной бронезащиты // Материалы 36-й НТК «Проектирование систем»: сб. МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2009. С. 65–69.

Курков Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф., doc.kurkov@mail.ru, Россия, Пенза, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения,

Куканов Сергей Анатольевич, канд. техн. наук, доц., kuk_76@mail.ru, Россия, Пенза, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения,

Зайцев Юрий Михайлович, адъюнкт, kristik301@mail.ru, Россия, Пенза, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения

APPLICATION NANOCOMPOSITE PROTECTIVE COMPOSITION IN PERSONAL BODY ARMOR

S.N. Kurkov, S.A. Kukanov, Y.M. Zaitsev

The possibility of applying a protective coating element (WE) Combined Arms vest (life safety) of polymer nanocomposite materials with the addition of carbon nanotubes (CNT). The mechanism of the effects on the heart of a fighter, equipped with GE OBZH coated polymer grade "Viksint PC-68" with the addition of CNT brand "Dealtom" with percentages of 0.5 % and higher.

Key words: combined arms body armor, a polymer composite material, carbon nanotubes, closed contusion, treble and bass pulses, impact pressure.

Kurkov Sergej Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, doc.kurkov@mail.ru, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics,

Kukanov Sergej Anatol'evich, candidate of technical sciences, docent, kuk_76@mail.ru Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics,

Zajcev Jurij Mihajlovich, associate, kristik301@mail.ru, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics

УДК [623.419 + 623.463] (091)

ИСТОРИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ АРТИЛЛЕРИИ В РОССИИ

С.В. Гуров

Рассмотрены основные моменты историко-технического развития реактивной артиллерии в России в период с 10-х гг. XIX века до наших дней.

Ключевые слова: ракета, реактивный снаряд, ракетный двигатель, установка, боевая машина, транспортно-заряжающая машина, залповый огонь, грузовой автомобиль, пуск, реактивная артиллерия, реактивная система залпового огня.

Проведённое исследование развития реактивной артиллерии в России в период с 10-х гг. XIX века до наших дней позволило выделить четыре хронологических этапа.

Первый этап: начало 10-х гг. XIX века – начало 30-х гг. XX века.

Второй этап: начало 30-х гг. XX века – конец Великой Отечественной войны.

Третий этап: май 1945 г. – конец 50-х гг. XX века.

Четвертый этап: конец 50-х гг. XX века – наши дни.

В каждом из вышеперечисленных этапов можно выделить подэтапы.

В начале первого этапа развития русские военные получили боевой опыт со станками для пуска 5 ракет вдруг во время Лейпцигского сражения 1813 г.

Во второй половине 20-х гг. XIX века проводились работы по более широкому диапазону лафетов. Так, были станки для залпового пуска с 4 (предположительно), 6, 8 и 36 направляющими, а также было предложение о постройке 9- и 15- ствольных станков по известным чертежам и способе изготовления. Наиболее распространённым можно считать шестизарядный станок. Развитие станков велось в направлении увеличения огневой мощности залпа одного станка за счёт возможности пуска ракет различных калибров или увеличения количества направляющих. Последние прошли развитие от желобковых до цилиндрических, посредством которых придавалось более правильное направление начального полёта и которые были более просты в изготовлении.

Первым испытанием ракет и станков для залповой стрельбы в боевых условиях стала Русско-турецкая война 1828 – 1829 гг. Архивные данные, подтверждающие этот факт, не обнаружены.

В XIX веке мнение российских и иностранных военных об эффективности и целесообразности применения систем залпового огня было весьма критическим. В качестве основных недостатков отмечались трудность обеспечения боеприпасами и большее время перезарядки, чем для одиночных станков.

Важным фактом в истории развития отечественной реактивной артиллерии можно считать проекты, предложенные в 1912 г. Иваном Валентиновичем Воловским, которые появились в результате развития научно-технического прогресса: появления самолётов, автомобилей и т.д. Воловский И.В. впервые для реактивной артиллерии предложил:

– прообразы установок (боевых машин) реактивной артиллерии в современном их понимании, включая вариант с направляющими с закрытым задним срезом (дном);

– стрельбу из многозарядных установок из-за укрытия, при движении и в любом направлении, не изменяя положения;

– контрольный аппарат с количеством кнопок, равным числу ракет, который должен был давать возможность получения ежеминутной полной картины состояния орудия. Этот аппарат можно считать прообразом пульта управления огнём и системы диагностики состояния артиллерийской части боевой машины или всей БМ;

– “Митральезу ракетную”, которую можно считать прообразом авиационных блоков орудий, в основном используемых в авиации, а также, как правило, в конструкциях самодельных установок различных повстанческих групп.

Основная часть предложений И.В. Волковского была реализована в следующих поколениях образцов мировой реактивной артиллерии [1].

К середине 30-х гг. идея использования механизированных средств и установок для пуска ракетных снарядов была уже сформирована, и во второй половине 30-х гг. начинаются работы по практической реализации этой идеи вначале для наземных войск, затем для военно-морского флота с учётом опыта работ для авиации.

Основными направлениями развития реактивной артиллерии до начала Великой Отечественной войны были следующие.

В части установок: использование колёсных типов шасси, а также гусеничных или прицепов; использование единого шасси для оснащения установками для пуска снарядов различных калибров; снижение времени перезаряжания установки; монтаж (метательной) установки как отдельного узла на шасси; обеспечение работы поворотных и подъёмных механизмов за счёт использования мотора автомобиля при условии обязательного дублирования ручными приводами; совмещение транспортной и транспортно-заряжающей машины с условием их электрификации; создание транспортной машины на прицепе (зарядного ящика) и командной установки на автомашине с генератором электрического тока, пультом наводки и управления стрельбой.

В части ракетных снарядов: использование единой ракетной части для снарядов с полной взаимозаменяемостью химической головки на осколочно-фугасную и наоборот; обеспечение равномерного (предположительно) образования осколков за счёт нанесения надрезов на корпус головной части; улучшение параметров кучности, точности и дальности боя; обеспечение удвоенной мощности и дальности стрельбы за счёт увеличения калибра снаряда; повышение мощности головной части за счёт увеличения её длины; обеспечение стрельбы как с механизированных многопланочных установок, так и с однопланочных.

Начало Великой Отечественной войны стало переломным моментом в развитии реактивной артиллерии. Этот период характеризуется организацией и развертыванием массового производства, организацией военной приёмки, а также первым применением реактивной артиллерии в боевых действиях. Имели место конфликты между производственниками и военпредами по поводу недопущения поставки на фронт недоукомплектованных и имеющих брак образцов. Документы свидетельствуют, что для

разрешения этих конфликтов и наведения порядка в процессе производства и поставки на фронт образцов привлекалось высшее руководство страны.

Основные направления развития реактивной артиллерии во время Великой Отечественной войны в части установок были следующими.

Для сокращения времени окончательной сборки и уменьшения простоя шасси на сборочных заводах монтаж метательной установки на шасси производился через подрамник как отдельный узел.

Осуществлялся поиск наиболее оптимального типа шасси. Состоялся переход от неполноприводных к полноприводным шасси грузовых автомобилей (наиболее распространённый тип шасси – шасси серий американского грузового автомобиля Studebaker. Использовались унифицированные элементы конструкций метательных установок в железнодорожных и морских образцах (идеология конструкции сухопутных установок – единое основание с подъёмным и поворотным механизмами для монтажа различных ферм с направляющими, заложенная в годы войны, была применена в конструкциях первых боевых машин (БМ-24 и БМ-14), разработанных после войны).

С целью повышения функциональности установок разрабатывались различные типы направляющих: *прямолинейная балочного (рельсового) типа* для придания направления снаряду; *призматического (сотового) и рамного типа* с ведущими элементами для придания направления снаряду; *цилиндрические* открытого типа с ведущими элементами для придания направления и вращательного движения снаряду.

Основными направлениями развития реактивной артиллерии во время Великой Отечественной войны в части ракетных снарядов были следующие:

использование единой ракетной части для снарядов различных калибров;

использование двух типов порохов для зарядов ракетных двигателей: нитроглицеринового и пироксилинового (часть порохов поставлялась из-за границы, т.е. в годы войны СССР зависел не только от иностранных поставок шасси для установок, но и от поставок порохов для зарядов ракетных двигателей);

увеличение мощности головной части за счёт увеличения её длины или калибра;

увеличение дальности полёта за счёт использования двухкамерного ракетного двигателя, а, следовательно, и большего количества пороха;

повышение параметров кучности как за счёт конструкции снаряда – обеспечение вращения за счёт тангенциальных отверстий в головной части ракетной части, радиально расположенных штуцеров с внутренним кана-

лом и наружным выходным отверстием, просверленным под углом 90° к продольной оси, в каждом и косо поставленных лопастей блока стабилизатора ракетной части), так и за счёт конструкций направляющих установок (спиральные направляющие с внутренними винтовыми ведущими элементами (проворот обеспечивал повышение кучности снарядов в обоих случаях, но снижал дальность полёта в первом случае).

Сухопутные установки стали основой для морских установок при ведении залпового огня. Их развитие первоначально шло в направлении использования в речных условиях, а уже затем морских, что потребовало существенной доработки установок. Основные направления их совершенствования: снижение продолжительности залпа; увеличение диапазона углов вертикального наведения; увеличение скорости вертикального наведения заряженной установки; увеличение скорости горизонтального наведения; снижение усилия на штурвале (рукоятке) заряженной установки при вертикальном и горизонтальном наведении [2].

После окончания Великой Отечественной войны работы по реактивной артиллерии в России были направлены на её дальнейшее развитие при продолжавшейся некоторое время эксплуатации образцов разработанных в годы войны боевых машин М-8, М-13, М-13Н и М-31-12 и реактивных снарядов М-8, М-13, М-13УК, М-31, М-31УК и М-20. Наиболее долговечными из них были боевые машины серий БМ-13 и снаряды серий М-13. Работы по РА проводились в трёх основных направлениях:

- эксплуатация систем периода Великой Отечественной войны в исследовательской и общевойсковой практике;
- разработка предложений и проведение практических работ по модернизации составляющих основных систем реактивной артиллерии, созданных в годы Великой Отечественной войны;
- проведение оценки имевшихся систем, выдвижение предложений по созданию новых систем РА и проведение конкретных работ по ним.

После окончания войны была проведена оценка эффективности боевого применения конкретных образцов реактивной артиллерии периода Великой Отечественной войны, на основании которой был сделан вывод, что независимо от наличия вооружения (полностью оправдавшего себя в ходе войны и не требующего замены или модернизации в ближайшие годы) *совершенно необходимо развивать дальше артиллерию и совершенствовать существующую систему вооружения*. Проведены работы по формулированию общих направлений модернизации: увеличение мощности и улучшение баллистических и эксплуатационных свойств систем; упрощение технологии производства; увеличение дальности стрельбы; повышение параметров кучности; возможность длительного хранения на складах (10 – 20 лет); использование шасси грузовых автомобилей отечественного

производства. Направлениями развития РА, известными в период Великой Отечественной войны для систем реактивной артиллерии и применёнными в послевоенный период, были следующие:

в части боевых машин: монтаж штатных и доработанных артиллерийских частей, включая для пуска снарядов различных калибров, на новых типах шасси; использование доработанных артиллерийских частей для монтажа на ряде кораблей;

в части реактивных снарядов: увеличение дальности за счёт увеличения калибра снаряда и длины снаряда; создание нескольких типов головных частей; использование нескольких типов многошашечных пороховых зарядов; удлинение камеры ракетного двигателя и соответственно увеличение массы порохового заряда для увеличения дальности стрельбы; использование единого взрывательного устройства как для боеприпасов различных калибров; использование однотипных снарядов для сухопутных и морских систем.

Первыми послевоенными системами отечественной реактивной артиллерии стали системы М-24 и М-14, МД-20, разработанные по тактико-техническим требованиям 1947 г. и принятые на вооружение в 1951 и 1952 гг., и варианты на их основе. Впервые внедрёнными в практику усовершенствования и техническими решениями были следующие:

в части боевых машин: гладкоствольные направляющие без наличия и с наличием внутренних элементов, что можно объяснить меньшей трудоёмкостью их изготовления по сравнению с сотовыми направляющими и положительным влиянием на полёт снаряда, а, следовательно, параметры кучности и точности; взаимозаменяемость направляющих, изготовленных по разным технологиям; разработка устройства для заряжания снарядов в направляющие боевых машин с целью облегчения процесса заряжания номерами расчёта по причине трудности заряжания боевых машин без них вследствие больших масс снарядов и достаточно большой высоты расположения направляющих;

в части реактивных снарядов: применение снаряда с большим удлинением для повышения дальности стрельбы; использование одношашечного заряда твёрдого топлива для ракетной камеры и соплового блока с косо поставленными сопловыми отверстиями в сочетании с жёсткокреплёнными лопастями блока стабилизатора (благодаря первому решению возрастала поверхность горения заряда твёрдого топлива, а, следовательно, и обеспечивалось увеличение тяги двигателя, благодаря последнему решению повышались параметры кучности снарядов; тормозные кольца одновременно использовались для обеспечения лучшей кучности при стрельбе на средние дальности и вводилось большее число установок взрывателя для более эффективного поражения ряда целей).

Концептуальными направлениями развития для систем реактивной артиллерии на данном этапе развития были следующие. Работы по переходу на грузовые автомобили только на шасси отечественного производства, что можно объяснить ухудшением отношений с бывшими партнёрами (США, Великобританией), развитием отечественного автомобилестроения и стремлением к независимости от других стран по всем комплектующим, что особенно актуально на случай войны и осложнения политико-экономических отношений.

В основных системах нового поколения (М-24, М-14) стали применяться новые типы снарядов – турбореактивные снаряды, что повысило кучность снарядов послевоенной разработки по сравнению с оперёнными снарядами, разработанными в годы Великой Отечественной войны.

Впервые было осуществлено десантирование буксируемой установки реактивной артиллерии, что расширило сферу боевого применения в особых (локальных) условиях.

Появилась возможность выполнения большего количества боевых задач при использовании однотипных снарядов за счёт усовершенствования техники пуска боеприпасов.

Впервые начался экспорт систем реактивной артиллерии отечественной разработки и производства, благодаря чему советские системы стали составлять огневую мощь иностранных государств, что можно объяснить их максимальной проверкой в боевых условиях Великой Отечественной войны, а также началось обучение иностранных специалистов эксплуатации рассматриваемого класса вооружения, что, в частности, способствовало развитию языкового общения в области реактивной артиллерии [3].

Конец 50-х гг. XX века характеризуется началом работ по будущей реактивной системе залпового огня «Град», ставшей со временем самой распространённой в мире, и началом нового этапа развития реактивной артиллерии в России. В этот период были разработаны системы реактивной артиллерии для снарядов калибров 122, 220 и 300 мм с применением отдельных технических решений (подходов), реализованных в системах реактивной артиллерии довоенного, военного и послевоенного периодов, которые долгое время эксплуатировались в России и поставлялись в иностранные государства. В некоторых из них было организовано производство составляющих систем военного, послевоенного и нового поколений и их аналогов.

В конструкциях составляющих системы «Град» были применены следующие новые технические решения:

в конструкции реактивного снаряда: ракетный двигатель с крышкой-соплом с семью каналами и со складывающимися лопастями блока стабилизатора (последнее решение позволило повысить мощность залпа

одной боевой машины и снизить количество задействованных боевых машин для выполнения однотипной задачи по сравнению с боевыми машинами БМ-24 и типа БМ-14 предыдущего поколения); разработан реактивный снаряд большого удлинения меньших массы и длины, но более мощный по осколочно-фугасному действию и большей дальности, чем ранее разработанный снаряд МД-20-ОФ (в сравнении с головной частью снаряда М-14-ОФ боевая эффективность вновь разработанной ГЧ была повышена в 2 раза); отработан однокамерный двигатель, состоящий из двух труб с одношашечными зарядами в каждой трубе с разными размерами внутренних каналов – большего диаметра в головной трубе (головная шашка) и меньшего диаметра в хвостовой трубе (хвостовая шашка). Данное конструктивное решение было применено в дальнейшем в конструкциях ракетных двигателей РС РСЗО «Ураган» и «Смерч»; отработаны изготовление цилиндрических рифлёных втулок для головной части, что обеспечило создание большего количества осколков, а, следовательно, большую их плотность, и повышение осколочного воздействия на цель; использовано новое взрывчатое вещество большей массы, что повысило фугасность головной части при детонации;

в конструкции боевой машины применены: люлька для монтажа на ней пакета направляющих, т.е. произошёл окончательный отход от использования в составе артиллерийской части фермы для крепления на ней направляющих; цилиндрическая трубчатая направляющая с винтовым направляющим пазом; электрический привод для выполнения наведения поворотной части по углу возвышения и по азимуту; пневмооборудование, служившее приводом для механизмов стопорения качающейся и поворотной частей артиллерийской части и выключения рессор шасси автомобиля;

в конструкции транспортной машины выполнен комплект стеллажей для транспортировки и хранения РС, что обеспечило снижение времени перезарядки пакета направляющих на огневой позиции, но не времени, требуемого для всего цикла по подготовке к стрельбе.

К концу 60-х – началу 70-х гг. XX века относятся первые проработки по системам коррекции полёта снарядов, а также смесового твёрдого топлива для ракетных двигателей снарядов РСЗО.

Впервые в 70-х гг. XX века создается боевая и транспортно-заряжающая машина на шасси грузового автомобиля с колёсной формулой 8×8 для системы «Ураган».

Впервые в 70 – 80-х гг. XX века на вооружение Советской Армии принимаются снаряды с отделяемыми головными частями моноблочного и кассетного типов. Благодаря первым повышалось осколочное воздействие на цель, а благодаря вторым появилась возможность использовать голов-

ную часть снаряда реактивной артиллерии в качестве средства доставки отдельных боевых и небоевых полезных нагрузок.

Впервые во второй половине XX века на вооружение Советской Армии принимается дальнобойная система «Смерч» со следующими основными техническими решениями.

В конструкции корректируемого реактивного снаряда, вводимого впервые в состав системы реактивной артиллерии, применяется инерциальная система управления, обеспечивающая угловую стабилизацию снарядов на активном участке траектории и коррекцию дальности за счёт поправки к времени отделения головной части, определяемой бортовой аппаратурой в соответствии с измеряемыми параметрами движения снаряда. Благодаря её использованию было получено улучшение параметров кучности и точности стрельбы по сравнению с неуправляемыми реактивными снарядами систем реактивной артиллерии предыдущих поколений; смесевое твёрдое топливо для ракетного двигателя, благодаря высокоэнергетическим характеристикам которого была увеличена дальность полёта; блок стабилизатора с шестью раскрывающимися лопастями;

В конструкции боевой машины использованы механизм стыковки в конструкции направляющей, предназначенный для стыковки (расстыковки) разъемов, обеспечивающих электрическую связь между бортовой аппаратурой снаряда и наземной аппаратурой подготовки и пуска, предназначенной для контроля стыковки снаряда с направляющей, проверки цепей стрельбы, ввода данных полётного задания и производства пуска; направляющая с двумя направляющими пазами; прибор-свидетель на направляющей пакета направляющих для определения температуры заряда ракетного двигателя реактивного снаряда; наземная аппаратура подготовки и пуска (НАПП), предназначенная для контроля стыковки снаряда с направляющей, проверки цепей стрельбы, ввода данных полётного задания и производства пуска; защита, позволяющая вести огонь в условиях применения противником химического, бактериологического и ядерного оружия с последующей дегазацией техники и санитарной обработкой личного состава; подставки в конструкции боевой машины для установки в них пулемёта, автомата и гранатомёта.

С 90-х гг. XX века проводятся работы по новым образцам реактивной артиллерии на основе трёх основных систем нового поколения: РСЗО «Град», «Ураган» и «Смерч». Направления их развития: повышение дальности, точности, кучности снарядов, создание управляемых реактивных снарядов, автоматизация процессов работы составляющих системы. За период работ с конца 50-х гг. XX века до наших дней максимальная дальность полёта снарядов была увеличена с 10 800 до 20 380 м и до

70 000...90 000 м к его завершению. Благодаря увеличению дальности дальнобойные системы реактивной артиллерии стали составлять конкуренцию оперативно-тактическим комплексам малого радиуса действия, разработанным ранее [4]. К настоящему моменту проведены работы по снаряду 9М542 в составе системы “Смерч” с максимальной дальностью полёта 120 000 м. Снаряд является результатом работ по глубокой модернизации РС 9М55К РСЗО «Смерч» [5].

Список литературы

1. Гуров С.В. Отечественная и зарубежная реактивная артиллерия в XIX веке // Труды Четвёртой Международной научно-практической конференции (15 – 17 мая 2013 года) “Война и оружие. Новые исследования и материалы”: в 4 ч. Ч 1. Санкт-Петербург: ЦОП ФГКУ “ВИМАИВиВС” МО РФ, 2013. С. 456 – 473.

2. Гуров С.В. Развитие реактивной артиллерии в России в 30 – 40-х годах XX века // Труды Пятой Международной научно-практической конференции (14 – 16 мая 2014 года) “Война и оружие. Новые исследования и материалы”: в 4 ч. Ч 1. Санкт-Петербург: ЦОП ФГБУ “ВИМАИВиВС” МО РФ, 2014. С. 439 – 456.

3. Гуров С.В. Из истории развития реактивной артиллерии в России с окончания Великой Отечественной войны до конца 50-х годов XX века // Мир оружия: история, герои, коллекции : материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 100-летию Первой мировой войны, 23 – 24 октября 2014 г. / Федеральное государственное бюджетное учреждение культуры «Тульский государственный музей оружия». Тула, 2015. С. 79 – 95.

4. Гуров С.В. Из истории развития реактивной артиллерии в России с конца 50-х годов XX века до настоящего времени // Труды Шестой Международной научно-практической конференции (13 – 15 мая 2015 года) “Война и оружие. Новые исследования и материалы”: в 4 ч. Ч. 2. Санкт-Петербург: ЦОП ФГБУ “ВИМАИВиВС” МО РФ, 2015. С. 46 – 66.

5. Рекламный паспорт №442/12/ЭП 300-мм реактивный снаряд 9М542 увеличенной дальности стрельбы с неотделяющейся осколочно-фугасной головной частью к реактивной системе залпового огня 9К58 (“Смерч”) (индекс 9М542). Согласован 25.04.2012 г.

Гуров Сергей Викторович, инж. 2-й кат. sergeivgurov2008@rambler.ru, Россия, Тула, АО «НПО «СПЛАВ»

*HISTORICAL AND TECHNICAL MOMENTS
OF ROCKET ARTILLERY DEVELOPMENT IN RUSSIA*

S.V. Gurov

The main moments of the historical and technical development of rocket artillery in Russia in the period from the 10^s of the XIX century to the present time are considered.

Key words: rocket, rocket motor (engine), launcher, launch vehicle, transporter loader vehicle, ripple fire, truck, launch, rocket artillery, multiple rocket launcher, multiple rocket launcher system.

Gurov Sergei Victorovich, engineer of 2nd degree, sergeivgurov2008@rambler.ru, Russia, Tula, Joint-Stock Company «Research and Production Association «SPLAV»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 629.423.31

ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕЙТИНГ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА С АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ СИСТЕМАМИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В.Д. Тулупов, Ле Суан Хонг

В настоящее время при решении вопроса о выборе типа ТЭП для вагонов метрополитена необходимо использовать критерии, которые позволяют наиболее полно оценивать эффективность работы тягового привода на ЭПС в конкретных эксплуатационных условиях. Такой подход позволит наиболее рационально использовать ТЭП и, как следствие, приведет к повышению эффективности эксплуатации ЭПС. Представлен рейтинг вагонов метрополитена с помощью электротяговых характеристик ТЭП.

Ключевые слова: удельный расход электроэнергии, серийный вагон, тягово-энергетическая задача, пассажирские перевозки, рейтинг вагона метро, тяговый привод постоянного тока, асинхронный тяговый привод.

Сегодня проблема массовых пассажирских перевозок в крупных городах с населением 1 млн человек и более, как правило, успешно решается только посредством создания внеуличного транспорта – метрополитена, отличающегося большой пропускной способностью, высокой скоростью сообщения и регулярностью движения.

Вместе с тем, метрополитен относится к числу технически сложных и капиталоемких сооружений. Опыт показывает, что строительство метрополитена целесообразно осуществлять при наличии пассажиропотока не менее 50 тыс. человек в час в одном направлении. В будущем провозная способность линии метрополитена при эксплуатации 8-вагонных метропоездов может возрасти до 83 тыс. пасс./час в одном направлении. При этих и более высоких нагрузках только метрополитен способен обеспечить высокую комфортность перевозки пассажиров [1].

Московский метрополитен – это основа транспортной системы столицы. Он надежно связывает центр города с промышленными районами и жилыми массивами. На сегодняшний день в Москве перевозка пассажиров электрического транспорта (рис. 1) составляет близко 70...75 % (троллейбусным транспортом перевозится 10,4 %, трамваями – 9,7 %, метрополитеном – 56 % от общего количества перевезенных пассажиров в городах). По сведениям официального сайта Мосметрополитена, его услугами с среднем ежедневно пользуются более 7 млн пассажиров, а в будние дни этот показатель превышает 9 млн пассажиров. Это наивысший показатель в мире [2].



Рис. 1. Доля видов транспорта в Москве

Повышение роли метрополитенов в решении проблемы пассажирских перевозок и увеличение потребления ими электроэнергии делают настоятельно необходимым улучшение тягово-энергетических показателей электропоездов метрополитена, что является основным средством увеличения провозной способности линий метрополитена при одновременном ограничении роста или даже снижении удельного потребления энергии на единицу работы.

Очевидно, что в любом случае при создании новых систем ТЭП необходимо добиваться достижения максимального результата с наименьшими затратами, включая и затраты времени на разработку и освоение производства и эксплуатации. Вместе с тем, нужно учитывать и практические возможности реализации новых технических решений промышленностью и освоения их обслуживания в эксплуатации. Особенно актуальна эта задача в сложившихся трудных объективных условиях как в сфере производства, так и в сфере эксплуатации поездов метрополитена.

В связи с этим чрезвычайно актуальны рейтинги нескольких существующих вагонов метро (ВМ) [3] с помощью их характеристик для выбора более эффективного и рационального вагона.

Важнейшими характеристиками ВМ являются его электротяговые характеристики. Они определяют **показатели назначения**, т.е. показатели того, как быстро вагон разгоняется и движется по линии, сколько электроэнергии расходует на движение и насколько эффективна его тормозная система, т.е. система безопасности.

Главная тягово-энергетическая задача вагона метрополитена – перевезти максимальное количество пассажиров безопасно, быстро и экономично. Вагон, выполняющий эту задачу более эффективно, имеет более высокий рейтинг. Сумму показателей назначения, представленную в совокупности в относительных единицах и являющуюся тягово-энергетическим рейтингом вагона метро, можно рассчитать по формуле

$$R = \bar{V} \times \bar{A} \times \bar{\Sigma t} \times \bar{\Sigma L} \times 100 (\%), \quad (1)$$

где R – рейтинг вагона метро, %, а величины, входящие в формулу (1), представлены в относительных единицах по отношению к показателям вагона метро условной мод. **81.7XX** с идеальными электротяговыми характеристиками:

\bar{V} – скорость сообщения в относительных единицах, $\bar{V} = V/50$;

\bar{A} – относительный удельный расход электроэнергии на тягу, $\bar{A} = 58/A$;

$\bar{\Sigma t}$ – относительное суммарное время разгона, $\bar{\Sigma t} = (8 + 18 + 28)/\Sigma t$;

$\bar{\Sigma L}$ – относительные тормозные пути, $\bar{\Sigma L} = (120 + 200)/\Sigma L$.

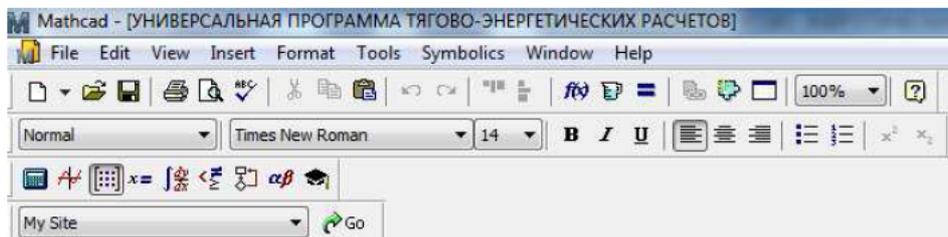
Согласно формуле (1) вагон метро мод. **81.7XX** с идеальными электротяговыми характеристиками имеет рейтинг 100 % (табл. 1), поскольку при максимальной нагрузке 22,4 т (320 пасс.) он разгоняется до скоростей 30, 60 и 80 км/ч соответственно за 8, 18 и 28 с, ездит по линии, состоящей из перегонов длиной 1700 м со скоростью сообщения 50 км/ч при 250-секундных остановках, имеет при этом удельный расход электроэнергии на тягу при реостатном торможении 58 Вт ч/т км, а его тормозные пути при скоростях 60 и 80 км/ч составляют 120 и 200 м. Эти показатели реализуемы в существующих условиях эксплуатации и близки к идеальным. Метропоезд из таких вагонов легко управляется машинистом и устойчиво работает на линии в часы «пик», поскольку имеет достаточные запасы хода на нагон случайных опозданий.

Для рейтинга вагонов метрополитена с различными системами тягового электропривода необходимо узнать их сравнительные электротяговые характеристики с помощью универсальной компьютерной программы тягово-энергетических расчетов в среде «Mathcad» (рис. 2). Расчет проведен для вагонов метрополитена с тяговым приводом постоянного тока (ТП ПТ) – серийный вагон 81.717/714 и с асинхронным тяговым приводом (АТП) – вагоны моделей 81.740А/741А («Русич»), 81.720А/760 (Яуза), 81.556/558 («Нева»). Полученные тягово-энергетические результаты расчетов подробно написаны в [4]. Главные показатели для сравнения и рейтинга вагонов метрополитена показаны в табл. 2.

Таблица 1

Данные показатели вагона метро мод. 81.7ХХ с идеальными
электротяговыми характеристиками

Вагон метро мод. 81.7ХХ, рейтинг 100 %	Скорость сообщения, км/ч	Расход энергии на тягу, Втч/ткм	Тормозные пути с 60 и 80 км/ч, м	Времена разгона до скоростей 30+60+80 км/ч, с
С идеальными электротяговыми характеристиками	50	58	120 + 200	8 + 18 + 28



Номер участка: $N_{уч} := \bullet$
 Длина участка (м): $L_{уч} := \bullet$
 Время движения по участку (с): $T_{уч} := \bullet$
 Средняя величина уклона при движении по участку: $p := \bullet$
 Максимальная (конструкционная) скорость движения (км/ч): $v_{max} := \bullet$
 Масса тары моторного вагона (т): $M_{мтара} := \bullet$
 Масса тары прицепного вагона (т): $M_{птара} := \bullet$
 Масса тары головного вагона (т): $M_{гтара} := \bullet$
 Количество пассажиров: $K_{пасс} := \bullet$
 Количество мест для сидения в прицепном вагоне: $K_{мп} := \bullet$
 Средняя масса одного пассажира (т): $M_{чел} := \bullet$
 Масса всего электропоезда с пассажирами (т): $M_{эп} := \bullet$
 Число тяговых машин (ТМ) всего электропоезда: $n_{ТМ} := \bullet$
 Передаточное число редуктора: $\mu := \bullet$
 Диаметр колеса (м): $D := \bullet$
 КПД зубчатой передачи: $\eta_{зуб} := \bullet$
 Напряжение контактной сети в режиме тяги (В): $U_{конт} := \bullet$
 Напряжение контактной сети в режиме рекуперативного торможения (В): $U_{ксп} := \bullet$
 Уставка тока якоря в режиме тяги (А): $I_{янт} := \bullet$
 Уставка тока якоря в режиме реостатного и рекуперативного торможения (А): $I_{явт} := \bullet$
 Максимальный ток возбуждения в режиме реостатного и рекуперативного торможения (А): $I_{мmax} := \bullet$
 Мощность на валу (кВт): $P_B := \bullet$
 Частота вращения (об/мин): $n := \bullet$
 Максимальная частота вращения (об/мин): $n_{max} := \bullet$
 Среднее время задержки реостатного контроллера при последовательном соединении ТМ (с): $\Delta t_{сц} := \bullet$
 Среднее время задержки реостатного контроллера при параллельном соединении ТМ (с): $\Delta t_{пт} := \bullet$
 Коэффициент ослабления поля: $\beta := \bullet$
 Сопротивление обмотки возбуждения ТМ (Ом): $R_{об} := \bullet$
 Сопротивление обмотки якоря ТМ (Ом): $R_я := \bullet$
 Сопротивление обмотки дополнительных полюсов ТМ (Ом): $R_{дп} := \bullet$
 Сопротивление индуктивного шунта в расчете на одну ТМ (Ом): $R_{шпма1ТМ} := \bullet$
 Коэффициент пропорциональности между I_d и I_B : $k := \bullet$
 КПД тягового привода: $\eta := \bullet$
 КПД преобразователя: $\eta_{пр} := \bullet$

Рис. 2. Универсальная программа тягово-энергетических расчетов

Таблица 2

Сравнительные тягово-энергетические показатели рассмотренных вагонов метро с различными системами тягового электропривода

Мод. вагонов	81.717/714	«Русич» 81.740А/741А	«Яуза» 81.720А/760	«Нева» 81.556/558
Скорость сообщения V , км/ч	48	42	48	48
Расход энергии на тягу A , Втч/ткм	66(43*)	41	59	58
Тормозные пути $\sum L$ с 60 и 80 км/ч, м	132 + 216	175 + 300	150 + 260	117 + 200
Времена разгона до скоростей $\sum t$ 30+60+80 км/ч, с	8,2 + 20,5 + 40	11 + 24 + 39	9,5 + 19,5 + 30	8 + 18 + 29

Используя данные табл. 1 и 2, по формуле (1) подсчитаны рейтинги вагонов метро существующих моделей, результаты которых представлены в табл. 3.

Таблица 3

Рейтинги вагонов метро рассмотренных моделей

Мод. вагонов	81.717/714	«Русич» 81.740А/741А	«Яуза» 81.720А/760	«Нева» 81.556/558
\bar{V}	0,96	0,84	0,96	0,96
\bar{A}	0,879(1,349*)	1,415	0,983	1
$\bar{\sum L}$	0,92	0,674	0,781	1,01
$\bar{\sum t}$	0,786	0,73	0,915	0,982
Рейтинг R , %	61(93,5*)	58,5	67,4	95,2

Примечание для табл. 2 и 3: * – показатели серийной мод.81.717/714 с ТП ПТ за счёт применения рекуперативного торможения и энергосберегающего алгоритма управления тяговым электроприводом.

Более высокий рейтинг ВМ указывает на его большую надежность, безопасность и экономичность в эксплуатации. Цена вагона, спроектированного на более высокий рейтинг, как правило, выше.

Однако такой подход не всегда правомерен. Для пояснения вышеуказанного подтверждения необходима оценка зависимости между рейтингом вагона метро и его ценой (рис. 3). Цена вагонов метро моделей 81.717/714, «Русич» 81.740А/741А, «Яуза» 81.720А/760 и «Нева» 81.556/558 взята из [5-6] и представлена в табл. 4.

Таблица 4
Цена вагонов метрополитена рассмотренных моделей

Вагонмод.	81.717/714	«Русич» 81.740А/741А	«Яуза» 81.720А/760	«Нева» 81.556/558
Цена за 1 вагон, млн руб.	30	67	60	75



Рис. 3. Зависимость между рейтингом вагона метро и его ценой

Очевидно, что цена вагона «Русич» мод. 81.740А/741А с АТП рассчитана не достаточно оптимально: его цена по сравнению с ценой серийного вагона мод. 81.717/714 с реостатно-контактной системой управления возросла более чем в два раза. А рейтинг вагона «Русич» по сравнению с рейтингом серийного вагона снизился.

Напротив, рейтинг вагона метро мод. «Яуза» 81.720А/760 с установленным на нем асинхронным тяговым приводом иностранной фирмы вырос по сравнению с рейтингом серийного реостатного вагона мод. 81.717/714 на 6,4 %, а по сравнению с рейтингом вагона «Русич» мод.

81.740А/741А – на 8,9 % и составил 67,4 % (цена вагона «Яуза» 81.720А/760 – 60 млн руб, меньше, чем вагона «Русич» мод. 81.740А/741А, – 67 млн руб.). Но этот рост не связан напрямую ни с какими-то особыми качествами АТП, которыми не обладает ТП ПТ, ни с новым качеством элементной базы импортной техники. Сама элементная база может быть закуплена у целого ряда инофирм и использована на вагонах с ТП ПТ.

У вагона «Нева» 81.556/558 самый высокий рейтинг, но его большой недостаток – очень высокая цена (в 2,5 раза выше, чем у вагона мод. 81.717/71). В связи с этим его конкурентный способ тоже снизится.

Рейтинг ВМ серийного вагона мод. 81.717/714 с ТП ПТ отечественного производства также может быть доведен до уровня более 90 %, если будут оптимизированы и доработаны его электротяговые характеристики за счёт применения на них рекуперативного торможения и энергосберегающего (ЭС) алгоритма управления тяговым электроприводом, достигаемого при относительно малых затратах и с использованием большей части установленного на них электрооборудования [7-8]. А надежность его тяговой установки не уступит надежности импортного АТП, если будут доработаны электросхемы вагона и тщательно отработаны технологии производства, наладки и эксплуатации электронных систем. При реализации на ВМ с ТП ПТ простых и проверенных на опытных образцах технических решений по совершенствованию их ТЭП они не будут уступать поездам с АТП ни по одному показателю. При цене, ориентировочно много меньшей [9], они будут существенно эффективнее. В то же время электроподвижный состав с АТП имеет и ряд недостатков, часть из которых была выявлена в испытаниях и эксплуатации во Франции [10 – 11]. Анализ и оценка в [12] показывают, что по энергетическим показателям ЭПС с ТП ПТ имеют лучшие показатели, а с АТП – наихудшие. Разница в их «энергетической эффективности» превышает 3 %. При большей цене и увеличенном расходе энергии применение АТМ на ВМ вместо ЭС ТЭП может быть экономически оправдано только в случае резкого сокращения других расходов, в частности, за счет повышения надёжности и снижения затрат на обслуживание ТМ. Некоторыми специалистами активно пропагандируется тезис о фантастической экономической эффективности этих факторов. Однако известные факты показывают, что ее нет. Применение ЭПС с АТП целесообразно, если ЭПС с ТП ПТ не может обеспечить требуемые технические характеристики, в частности, при скорости движения на магистральном транспорте более 200 км/ч.

В целом же изложенные факты и соображения показывают, что использование ТЭП с ТП ПТ перспективно. Важнейшим их преимуществом является возможность использования полученных результатов при модернизации эксплуатируемых ВМ [13].

По аналогии с тягово-энергетическим рейтингом могут быть рассчитаны рейтинги эксплуатационной надежности и безопасности вагонов. Эти рейтинги как интегральные показатели экономичности, надежности и безопасности целесообразно указывать в техническом задании на вагон, а при проведении испытаний включать в программы тягово-энергетических [14] и эксплуатационных испытаний. Вагон, прошедший такие испытания и показавший установленный ему техническим заданием рейтинг, можно допускать к эксплуатации с пассажирами и ставить на серийное производство.

Список литературы

1. Ле Суан Хонг. Техническое обоснование необходимости выбора систем тягового электропривода вагонов метрополитена // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы второй Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омск. гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2014. С. 135 – 142.

2. Интернет – ресурс. Официальный сайт Мосметрополитена [Электронный ресурс] URL: <http://www.mosmetro.ru/about/information> (дата обращения: 10.03.2016).

3. Мнацаканов В.А. Инновационный метропоезд «Нева». Тягово-энергетические испытания // Метро и тоннели. 2014. № 1. С. 30 – 34.

4. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Расчет тягово-энергетических характеристик метрополитена с различными системами тягового электропривода с помощью программы «Mathcad» // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Вып. 2. С. 37 – 42.

5. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Сравнительная технико-экономическая эффективность вагонов метрополитена с альтернативными системами тягового электропривода // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. № 3 (Т. 11). С. 30 – 38.

6. Интернет форум "Мое метро" [Электронный ресурс] URL: <http://forum.nashtransport.ru/index.php?show-topic=17206> (дата обращения: 10.03.2016).

7. Тулупов В.Д. Улучшение энергетических показателей электропоездов // Железнодорожный транспорт. 1991. №9. С. 38 – 41.

8. Ле Суан Хонг. Моделирование системы тягового электропривода вагонов метрополитена с наилучшими энергетическими показателями // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V Междунар. науч.- техн. конф. Т. 1. Томск. 10-14 ноября 2014 г. / Министерство образования и науки РФ. Томский политехнический университет. Томск, 2014. С. 407 – 411.

9. Ле Суан Хонг. Оценка экономической эффективности альтернативных систем тягового электропривода поездов Московского метрополитена // Экономические аспекты логистики и качества работы железнодорожного транспорта: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. Омск, 2013. С. 8 – 12.

10. Nouvion F.F. Into the second century // *Railway Gazette International*. 1979. April. P. 296 – 300.

11. Nouvion F.F. Consideration on the use of d.c and three-phase traction motors and transmission system in the context of motive power development // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1987. Vol. 201. № 2. P. 99 – 113.

12. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Технико-экономическая оценка эффективности вагонов метрополитена с альтернативными системами тягового электропривода // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки* 2015. Вып. 10. Тула: Изд-во ТулГУ, 217 с.

13. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Анализ и оценка энергоэкономической эффективности вагонов метрополитена с альтернативными системами тягового электропривода // *Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика*. Т. 15. №3. С. 74 – 81.

14. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Обоснование и выбор системы тягового электропривода вагонов метрополитена // *В мире научных открытий*. 2015. № 7.8 (67). С. 3119 – 3130.

Тулупов Виктор Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., tulupovVD@mpei.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,

Ле Суан Хонг, асп., tenbigstar1209@yahoo.com, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

TRACTION-ENERGY RATING FOR METRO WITH ALTERNATIVE ELECTRIC TRACTION SYSTEMS

V.D.Tulupov, Le Xuan Hong.

At present, when deciding on the choice of the type of traction electric drive (TED) for Metro must use criteria that allow more fully assess the efficiency of the traction drive on electric rolling stock (ERS) in specific operating conditions. This approach will allow the most efficient use of the TED, and as a result will lead to efficiencies ERS operating instructions manual. The article presents a rating of Metro using their Electrotraction characteristics of TED.

Key words: specific energy consumption, the serial car, traction and energy problem, passenger transport, the rating Metro, asynchronous traction (AC), DC traction.

Tulupov Victor Dmitrievich, doctor of technical sciences, professor, tulupovVD@mpei.ru, Russia, Moscow, National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,

УДК 628.9.04

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА КАК ПРИНЦИП УПРАВЛЕНИЯ ЗАТРАТАМИ НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

С.В. Гужов

Предложен аналитический подход к формированию системы оценки эффективности элементов системы энергоменеджмента, позволяющий оценить точность и доверительную вероятность возможности снижения объёмов потребления энерго-ресурсов и создает предпосылки к формированию обоснования эффективности внедрения элементов системы энергетического менеджмента в действующих электротехнических комплексах.

Ключевые слова: энергоменеджмент, точность, доверительная вероятность, энергосбережение.

Мероприятия, реализуемые организациями для снижения объёмов потребления энергетических ресурсов, основываются на внедрении в т.ч. элементов системы энергетического менеджмента. Опыт пилотных внедрений показывает разную эффективность одинаковых энергосберегающих мероприятий для организаций при наличии либо отсутствии системы энергоменеджмента. Масштабное внедрение системы энергетического менеджмента сдерживается отсутствием показанной гарантии последующего снижения объёмов энергопотребления.

13 декабря 2011 г. ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации» инициировал разработку проекта национального стандарта ГОСТ Р, регламентирующего вопросы внедрения энергетического менеджмента на предприятиях. Целью документа являлось предоставление организациям механизма разработки систем и процессов, необходимых для снижения энергозатрат и повышения энергетической эффективности используемых процессов. Потенциал энергосбережения в российской экономике был оценён для различных секторов (рис. 1). Наибольший потенциал энергосбережения был выявлен в промышленности, ТЭК, ЖКХ, где предполагалось экономить до 25 % потребляемых энерго-ресурсов [1]. 26 октября 2012 г. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 568–ст ГОСТ Р ИСО 50001-2012 «Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению» утверждён и введён в действие.

Стандарт предлагает следующий порядок реализации изменений: «планирование (plan) – осуществление (do) – проверка (check) – действие (act)». С момента утверждения элементы данной последовательности были переработаны и сформулированы, например, в качестве этапов реализации стратегии развития энергосбережением [1]:

I – ситуационный анализ (макроэкономические факторы, кооперационные связи, конкурентная среда);

II – прогнозные расчеты (динамика основных рыночных параметров, динамика технико-экономических параметров);

III – планирование целей развития (формирование приоритетов развития, технико-экономическое обоснования целей, расчет экономической эффективности);

IV – планирование стратегических действий (формирование программы развития, обеспечения конкурентоспособности, ресурсо- и энергосбережение).

Структура стандарта включает в себя концепцию цикличного прохождения этапов: энергетическое планирование; внедрение и функционирование; проверка; анализ со стороны руководства. Данный подход соответствует процессному подходу модели ключевых аспектов деятельности компании, включающему аспекты: финансовая деятельность, отношения с потребителями, обучение и развитие, организация бизнес-процессов внутри организации [2]. Внутренними процессами предприятия, в первую очередь затрагиваемыми при внедрении системы энергетического менеджмента (далее процессами СЭнМ), как и любого менеджмента, будут являться следующие.

1. Обучение ответственного персонала с ожиданием получения эффекта, не относящегося к области эффектов от технических решений;

2. Внедрение инструмента планирования, позволяющего накапливать профильную информацию, анализировать её, принимать управленческие решения и изучать эффективность вносимых изменений. Часто таким инструментом является электронная информационно-аналитическая система;

3. Осуществление действий по постоянному улучшению результативности деятельности в области энергосбережения посредством реализации мероприятий, имеющих ожидаемым результатом снижение объёмов потребляемых энергоресурсов.

Одной из задач анализа результативности внедрения является определение минимального числа статистических данных N_{MIN} , с достаточными для дальнейшего анализа точностью δ и доверительной вероятностью γ . Поскольку действие ГОСТ Р ИСО 50001-2012 распространяется на все организации Российской Федерации, рассмотрим эффекты его внедрения для известных документально подтверждённых примеров. В качестве анализируемых данных в статье рассматриваются документированные факты x_i ,

описывающие достижения экономии энергоресурсов на предприятии как результат внедрения СЭнМ. Исследуемый массив X анализируемых данных классифицируется как выборка k непрерывных случайных величин [3]. Среднеарифметическое значение

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^k x_i / k. \quad (1)$$

Математическое ожидание непрерывной случайной величины X , возможные значения которой принадлежат отрезку $[0; +\infty)$, рассчитывается через определённый интеграл:

$$M(X) = \int_0^{+\infty} x * f(x) dx, \quad (2)$$

где X – непрерывная случайная величина; $f(x)$ – плотность распределения непрерывной случайной величины X .

Опираясь на параметр $M(X)$, для выявления типа распределения случайной величины также удобно пользоваться правилом трёх сигм. На практике данное правило также используется в следующем виде: если распределение изучаемой непрерывной случайной величины неизвестно, но абсолютная величина отклонения превышает утроенное среднее квадратическое отклонений лишь в 0,27% случаев или меньше, то есть основание предполагать, что изучаемая величина распределена нормально; в противном случае она распределена не нормально [3].

Дисперсия непрерывной случайной величины

$$D(X) = \int_0^{+\infty} [x - M(X)]^2 * f(x) dx. \quad (3)$$

Поскольку выборочная дисперсия является смещённой оценкой генеральной дисперсии, то на практике при объёме выборки $k < 30$ используют исправленную дисперсию с числом членов в знаменателе $(k - 1)$. В таком случае оценка значения дисперсии

$$D(X) = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})^2}{k - 1}. \quad (4)$$

Среднее квадратичное отклонение непрерывной случайной величины, т.е. рассеяние случайной величины вокруг её математического ожидания, определяется равенством

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)}. \quad (6)$$

При необходимости оценить математическое ожидание с наперёд заданной точностью δ и доверительной вероятностью γ , минимальный объём выборки, который обеспечит эту точность, можно вычислить по формуле

$$N_{MIN} = \frac{t^2 \sigma^2}{\delta^2}, \quad (6)$$

где t – аргумент, которому соответствует значение функции Лапласа, равное $\gamma/2$.

В случае с неизвестным значением σ генеральной совокупности используют оценку

$$s^2 = \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})^2}{k-1}. \quad (7)$$

Формула (6) может быть преобразована:

$$N_{MIN} = \frac{t^2 s^2}{\delta^2}. \quad (8)$$

Нетрудно заметить, что (8) существенно зависит от значений анализируемых данных x_i . Для дальнейшего анализа примем к рассмотрению несколько значений доверительной вероятности γ с расчётом N_{MIN} для каждого из них по формуле (8). Результаты (таблица) наглядно демонстрируют γ и δ для некоторых из рассчитанных объёмов выборки. Например, при $k=15$ $\delta=25\%$ и $\gamma=99\%$; при $k=25$ $\delta=5\%$ и $\gamma=50\%$.

Результаты расчётов $N_{MIN} = f(\delta, \gamma)$

Доверительная вероятность (γ)	Минимальное число статистических данных N_{MIN}		
	Погрешность $\delta=5\%$	Погрешность $\delta=25\%$	Погрешность $\delta=50\%$
$\gamma=0,99$ ($t=2,58$)	364	15	4
$\gamma=0,95$ ($t=1,96$)	210	8	2
$\gamma=0,90$ ($t=1,65$)	149	6	1
$\gamma=0,80$ ($t=1,29$)	91	4	1
$\gamma=0,50$ ($t=0,68$)	25	1	0

При решении задачи определения минимального числа статистических данных необходимо задать граничные условия, заключающиеся в минимально допустимых значениях δ и γ . Случай, при котором $\gamma=1$ и $\delta=0$, возможен при $N_{MIN} \rightarrow \infty$, что маловероятно в случае внедрения СЭнМ в одной организации. Поэтому необходимо решить оптимизационную задачу выбора между погрешностью измерений (чем больше погрешность, тем меньше точности в определении эффекта от внедрения элемента системы энергетического менеджмента) и доверительным интервалом (чем больше интервал, тем больше вероятность пропуска значимых факторов).

Представляется важным установление возможной взаимосвязи такого процесса СЭнМ, как затраты на обучение ответственного персонала, и затрат на процесс реализации энергосберегающих мероприятий. Анализ проводился на основании выборки 100 % исходных данных, полученных из официального сайта «Единой информационной системы в сфере закупок» [4]. Организациями, наиболее вложившимися в повышение квалификации в сфере развития элементов системы энергетического менеджмента, являются: в 2012 году Минэнерго России (37 616 500,00 руб.); в 2013 – ФГБУ "РЭА" Минэнерго России (8 000 000,00 руб.) и ПАО "ФСК ЕЭС» (5 962 245,00 руб.); в 2015 – ОАО "Межрегиональная распределительная сетевая компания Юга" (800 000,00 руб.). Распределения затрат на обучение и затрат на энергосберегающие мероприятия близки к нормальному (рис. 1), что подтверждает тезис о целесообразности проведения предварительного обучения персонала как первоначального этапа внедрения СЭнМ.

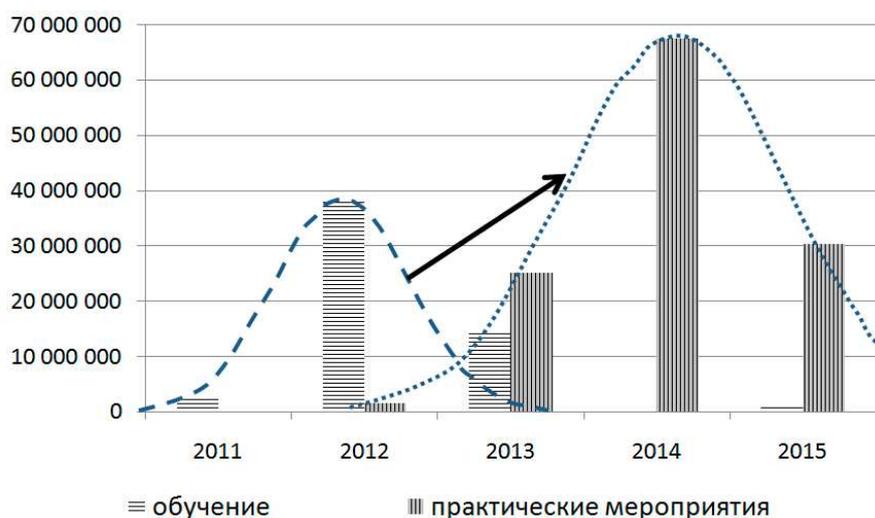


Рис. 1. Статистика суммарных стоимостей закупок (руб.), совершающихся в сфере развития элементов системы энергетического менеджмента

Проведённый анализ с точностью не ниже 95 % и доверительной вероятностью $\gamma \geq 0,50$ показал связь между объёмами инвестирования в обучение персонала и последующей отдачей в виде как минимум, 50 %-ного роста подготовленных и реализованных проектов внедрения энергосберегающих технологий.

Также необходимо отметить возможность повышения репутации компании за счёт информирования потенциальных потребителей о модернизации производства. Например, опубликованная в региональной газете информация о реализации энергосберегающего проекта на кондитерском комбинате ОАО «Кубань» явилась поводом к включению продукции комбината в состав армейского пайка [5].

Наибольший интерес представляет достоверность взаимосвязи расходов, связанных с внедрением стандарта ГОСТ Р ИСО 50001-2012 «Системы энергетического менеджмента...», и последующих снижений расходов на потребляемые энергоресурсы.

Рассмотрим тенденцию мероприятий «внедрение инструмента планирования» как элемент системы энергетического менеджмента. Наибольший объём данных, имеющий высокую точность (не ниже 80 %) и доверительную вероятность $\gamma \geq 0,95$, накоплен в Министерстве энергетики Российской Федерации. Снижение доли затрат на энергетические ресурсы в себестоимости продукции наблюдается у 62 % компаний, причем у 18 % из них снижение составило более 5 %, а у 44 % – от 3 до 5 % [6].

Анализ данных о доле затрат на ТЭР в стоимости произведённой продукции за 2011 – 2014 гг. [6] показал, что внедрение элементов СЭнМ приводит к снижению затрат на ТЭР в среднем на 6...8 % (рис. 2).

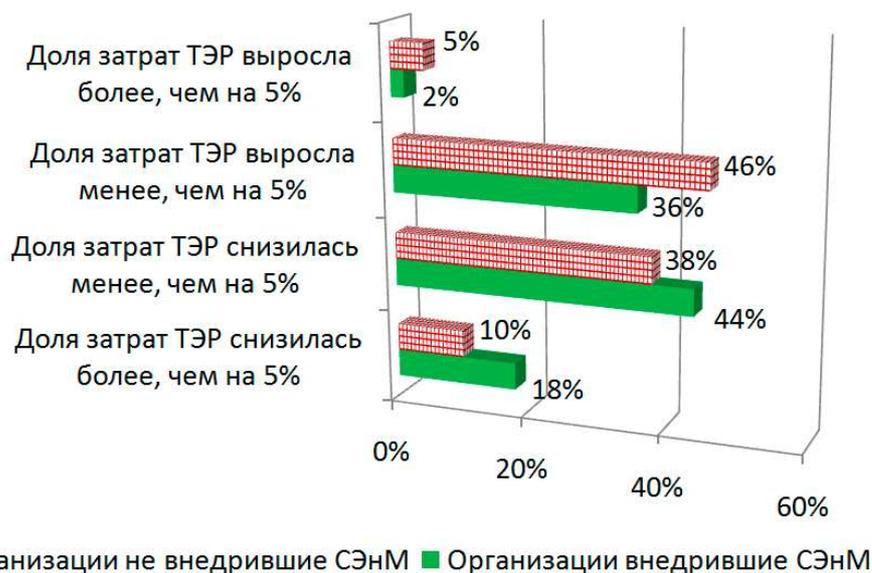


Рис. 2. Доля затрат на ТЭР в стоимости произведённой продукции за 2011 – 2014 г для компаний внедривших и не внедривших элементы СЭнМ

Аналогичную точность (не ниже 80 %) и (не ниже 95 %) достоверность имеет статистическая информация по внедрению стандарта EN 16001-2009 в Евросоюзе, позволившему снизить энергопотребление в среднем до 30 % [7].

Высокой точностью, но существенной индивидуальностью, а значит низкой индивидуальной доверительной вероятностью обладают, например, следующие примеры внедрения элементы СЭнМ:

1) для дочерних обществ ОАО «Лукойл» внедрение СЭнМ в части нормирования ТЭР позволило снизить энергоёмкость переработки нефти на 9,3 %, потребление тепловой энергии – на 6,3 % [8];

2) для ПАО «ФСК ЕЭС» внедрение smart greed в РФ как элемента системы энергетического менеджмента приведет к экономии 20...45 % потребляемой электроэнергии; снижению потерь от перерывов в подаче электроэнергии до 15 %; снижению аварийности и затрат на ремонтные работы до 10 %; экономии при выработке электроэнергии тепловыми электростанциями до 10...15 %; снижению коммерческих потерь электроэнергии на 95 % за счет оперативного выявления несанкционированных подключений; двукратному снижению технических потерь за счет установки приборов учета более высокой точности и адресного ремонта сети [9];

3) для Воронежской области внесение разработанных корректировок подпрограммы «Внедрение ресурсосберегающих технологий в ЖКХ области» на 2004 – 2010 годы позволило получить дополнительный социально-экономический эффект в виде снижения потерь: электроэнергии – 9,1 %; тепловой энергии – 4,6 %; холодного и горячего водоснабжения – 5,3 %; газоснабжения – 6,4 % [1];

4) для ОАО «Тульский комбайновый завод» [10] в результате внедрения программы энергосбережения достигнуто 10 %-ное снижение потребления электроэнергии на единицу произведенной продукции;

5) для ОАО «НИПОМ» внедрение информационного программного комплекса от производителя ООО «Сименс», как элемента СЭнМ позволило экономить до 10 – 15 % затрат на энергопотребление [11];

6) для г. Омска внедрённая система энергетического прогнозирования, применённая к проблематике методологии городского строительства, позволила предотвратить годовой ущерб от подтопления на селитебной территории в 83,93 млн руб. (в базовых ценах 1984 г.) [12];

7) для ТНК-ВР результаты программы энергосбережения за 2010 г. показали фактический объём экономии, равный 69 млн долл. [13];

8) внедрение элементов СЭнМ позволяет сэкономить до 50 % инвестиций, затраченных ранее на работы по повышению энергоэффективности [4];

9) для предприятий ОАО «СУЭК-Красноярск» эффект от внедрения организационно-экономического механизма управления энергосбережением за три года реализации программы энергосбережения оценивается в 50 млн рублей [14];

10) для города Chattanooga, расположенного на юго-востоке США, внедрение smart greed как элемента системы энергетического менеджмента позволило достичь ежегодной экономии в 3,3 кВт·ч на потребителя [15];

11) для ОАО «Арзамасский завод коммунального машиностроения» (ОАО «КОММАШ») внедрение системы АСКУЭ и реконструкция системы электроснабжения позволили существенно снизить аварийность в работе, приносявшие ранее убытки на сумму до 9,4 млн руб. в год. Получен-

ная прямая экономия от повышения энергетической эффективности составила 5,5 млн руб., что в совокупности около 40 % от общей суммы энергозатрат предприятия [11];

12) для кондитерского комбината ОАО «Кубань» модернизация производственных линий позволила увеличить объем производства на 20...25 % и снизить себестоимость выработки на 19,4 %. Единовременные инвестиции объёмом 15,5 млн руб. принесли эффект на сумму 6,5 млн руб. в первый год [5];

13) для ОАО «Янтарьэнерго» при внедрении элементов системы smart greed доля экономии ожидается около 17 % [15];

14) для ОАО «БЭСК» [16] усовершенствование систем управления и внедрение более 100 тыс. приборов «интеллектуального» учёта привело к: сокращению автотранспортного парка и расходов на ГСМ до 20 %; увеличению производительности труда на 60 %; сокращению сроков формирования годовой программы закупок на 33 %; увеличению полезного отпуска на 13 % при снижении потерь (с 9,3 % до 8,4 % за 2011 – 2014 гг.); сокращению средней продолжительности перерывов электроснабжения более чем в 2 раза;

15) для тайваньской компании «AU Optronics» внедрение СЭнМ позволило сократить потребление электрической энергии на 10 %, что составляет 55 млн кВт·ч [17];

16) для австрийского муниципалитета Vad Eisenkappel внедрение СЭнМ сократило электропотребление на 25 % [17], [18].

Значительная часть внедрения энергосберегающих мероприятий происходит посредством энергосервисных контрактов. Выборка с официального сайта Единой информационной системы в сфере закупок [19] по энергосервисными контрактам, имеющим начальную (максимальную) цену контракта (НМЦК) свыше 200 млн руб., приведена на рис. 4.

Несмотря на значительную сумму НМЦК, заметен рост числа подобных контрактов, что подтверждает тезис о взаимосвязи затрат на обучение ответственного персонала и затрат на реализацию энергосберегающих мероприятий. Поскольку источник выборки [18] является единой для всей Российской Федерации базой заключенных контрактов, то полученные данные (рис. 3) имеют точность не ниже 95 % и доверительную вероятность $\gamma \geq 0,99$.

Наиболее крупными заказчиками, реализующими практические мероприятия в области внедрения элементов СЭнМ, являются [18]: в 2013 г. Министерство образования и науки Российской Федерации (НМЦК = 23 200 000,00 руб.), в 2014 г. АО "Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях" (9 266 380,00 руб.) и АО "Югорская региональная электросетевая компания"

(34 500 000,00 руб.), в 2015 г. – ОАО "РАО Энергетические системы Востока"(14 305 000,00 руб.) и ОАО "Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях" (9 263 000,00 руб.).

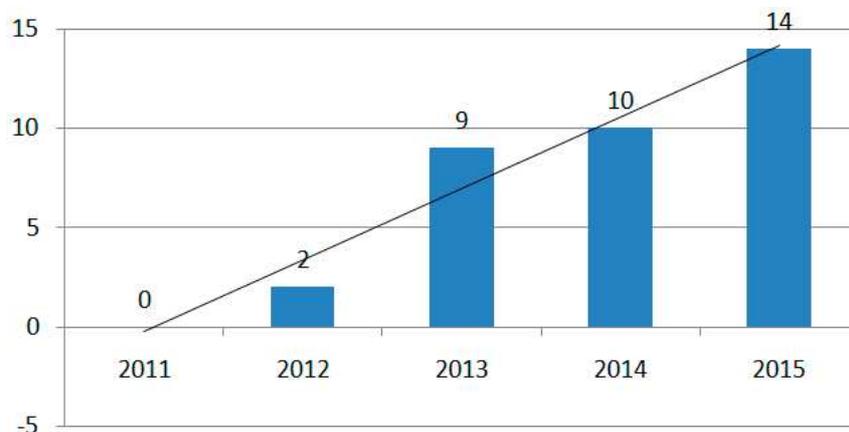


Рис. 3. Число энергосервисных контрактов, НМЦК свыше 200 млн. руб.

Предложенный аналитический подход к формированию системы оценки эффективности элементов системы энергоменеджмента, основанный на анализе статистических данных с использованием нормального распределения, позволяет установить связь между объёмами инвестирования в обучение персонала и последующим ростом числа подготовленных и реализованных проектов внедрения энергосберегающих технологий.

Агрегирование приведённой выборки: $X=[X1; X16]$ с точностью не ниже 75 % и доверительной вероятностью $\gamma \leq 0,99$ позволяет сделать вывод о том, что внедрение системы энергетического менеджмента на предприятиях различного масштаба приводит в среднем к снижению объёмов потребления энергетических ресурсов не менее чем на 8...17 % относительно базового уровня.

Список литературы

1. Семенов В.Н. Методологические основы управления системой энергосбережения в жилищно-коммунальном комплексе муниципального образования: автореф. дис. ... д-ра экон. наук М., 2011. 40 с.
2. Lambert G. ISO 50001 pilot programme: US companies implement standard with government support // ISO Focus+. 2011. P. 11-14.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для бакалавров. 12-е изд. М.: Юрайт, 2013. 479 с.

4. Аниськина Н.Н. К энергоэффективности через энергоменеджмент Компетентность №1. 2013. [Электронный ресурс] URL: <http://www.asms.ru/upload/iblock/780/78005c8a68fc575eabcfc2f51cea2737.pdf> (дата обращения: 10.03.2016).

5. Чуксина, Е.В. Внедрение системы энергоменеджмента на предприятиях // ЗАО "Энерго-Сервисная Компания". Портал организации. [Электронный ресурс] URL: <http://www.esk-e3.ru/press/smi/23-vnedrenie-sistemyi-energomenedjmenta-na-predpriyatiyah>. (дата обращения: 10.03 2016).

6. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышения энергетической эффективности в Российской Федерации в 2014 году // Министерство Энергетики Российской Федерации. [Электронный ресурс] URL: <http://gisee.ru/articles/stat/57079/> (дата обращения: 10.03 2016).

7. Михалевич И. Стандарты энергоменеджмента // Экономическая газета (2012 январь 01). [Электронный ресурс] URL: <https://neg.by/novosti/otkrytj/standarty-energomenedzhmentac-15654> (дата обращения: 10.03 2016)

8. Отчёт о деятельности ГК «Лукойл» за 2002 год // ГК «Лукойл». 2002. [Электронный ресурс] URL: <http://www.lukoil.ru/static.asp?id=18> (дата обращения: 10.03 2016).

9. Евлашин С. Применение технологий Smart Grid в контексте решения задач повышения энергоэффективности организаций // НИИЯФ МГУ. М., 2013. [Электронный ресурс] URL: <http://energoeducation.ru/files/prez%205-2%20Evlanshin.pdf> (дата обращения: 10.03 2016)

10. Эффективный энергоменеджмент предприятия и системы автоматизированного учёта. ООО «МБР», 2012. [Электронный ресурс] URL: <http://aiistue.ru/files/EnergoManagement.pdf> (дата обращения: 10.03 2016).

11. Шанцев, В. ОАО «НИПОМ»: эффект энергоменеджмента // Инвестиционный каталог Нижегородской области №28. [Электронный ресурс] URL: <http://invest-catalog.ru/number:27/article:432/> (дата обращения: 10.03 2016).

12. Сологаев В.И. Прогнозы и моделирование подтопления и дренирования в городском строительстве: дис. ... д-ра техн. наук Омск, 2003. 352 с.

13. Отчёт о результатах работы компании по приоритетным направлениям за 2014 год ТНК-ВР // ОАО «ТНК-ВР Холдинг». 2014. [Электронный ресурс] URL: <http://www.slideshare.net/irinadremucheva/iso-50001-2> (дата обращения: 10.03 2016).

14. Карпенко М.В. Формирование организационно-экономического механизма управления энергосбережением на горнопромышленных предприятиях: автореф. дис. ... канд. экон. наук. М., 2015. 24 с.

15. Гужов С.В. Интеллектуальные электросети и энергоменеджмент в развитии регионов России // «АВОК ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ». 2015. №7. С. 46 – 48.

16. Макаров А.Ю. Материалы презентации: развитие эффективной региональной энергетики ОАО «БЭСК» // Российский энергетический форум; пленарное заседание. 2015.

17. Организации, внедрившие первыми стандарт ИСО 50001, сообщают о значительных преимуществах ООО «Люди дела», 2011. [Электронный ресурс] URL: <http://quality.ludidela.ru/articles/638556/> (дата обращения: 10.03 2016).

18. Pinero E. Energy excellence: In comes the ISO 50001 energy management system standard // ISO Focus+. 2011. P. 8-10.

19. Официальный сайт Единой информационной системы в сфере закупок. [Электронный ресурс] URL: <http://zakupki.gov.ru/epz/main/public/home.html> (дата обращения: 10.03 2016).

Сергей Вадимович Гужов, канд. техн. наук, зам. нач. отдела энергоменеджмента, GuzhovSV@yandex.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт"

THE INTRODUCTION OF AN ENERGY MANAGEMENT SYSTEM AS THE PRINCIPLE OF COST MANAGEMENT ON EXISTING ELECTRICAL COMPLEXES

S.V. Guzhov

An analytical approach to the formation of a system of assessing the effectiveness of the elements of the energy management system, which allows to evaluate the accuracy and confidence probability opportunities to reduce consumption of energy and resources volumes and creates the preconditions for the formation of justification is efficiency-Drenia elements of the energy management system in the existing electro-technical complexes.

Key words: energy management, accuracy, confidence level, energy saving.

Guzhov Sergey Vadimovich, candidate of technical sciences, deputy head of energy management department, GuzhovSV@yandex.ru, Russia, Moscow, National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

УДК 681.2.087

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ РАЗРАБОТАННОГО
АВТОМАТИЧЕСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ДЕНДРОМЕТРА
С ЦИФРОВЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ**

И.Н. Рубцов

С помощью разработанного автоматического автономного высокочувствительного дендрометра было начато решение задачи разделения процессов, участвующих в динамике сезонного прироста стволов деревьев, на компоненты и анализа зависимостей внешнего влияния на каждый из них. Представлены результаты тестирования разработанного автоматического дендрометра на сосне желтой и сопоставление этих параметров с метеорологическими параметрами.

Ключевые слова: дендрометр, высокоточный абсолютный угловой энкодер, движение потока соков в дереве, метеорологические данные, изменения диаметра ствола дерева.

Сезонные изменения размеров стволов деревьев происходят под действием разных процессов, имеют различные временные особенности и должны контролироваться с помощью разных измерительных устройств. Реальный суточный прирост некоторых быстрорастущих образцов может достигать 0,1 мм в сутки по радиусу ствола [1].

Среди процессов, влияющих на суточные колебания диаметра ствола, фотосинтез имеет четкую суточную периодичность, в то время как транспирация может иметь высокочастотные колебания помимо закономерных суточных колебаний. Эти высокочастотные колебания, возникают из-за изменений температуры воздуха, влажности, параметров состояния почвы.

Для фиксации различных (в том числе и высокочастотных) колебаний ствола дерева, их контроля и последующего анализа был разработан и апробирован программно-аппаратный комплекс, состоящий из автомати-

ческого автономного кольцевого дендрометра, в котором, помимо возможностей уже существующих приборов (дендрографов и пр.), были использованы возможности высокоскоростных цифровых методов измерений и обработки данных.

Разработанный авторами автоматический дендрометр использует в своей основе в качестве измерительного элемента, определяющего перемещения, абсолютный цифровой высокоточный угловой энкодер, имеющий разрешение выходного сигнала в 12 бит, или 4096 уникальных позиций на оборот. Для обеспечения требуемой точности и компактности был также разработан механический узел преобразования, конвертирующий линейные перемещения в угловые. Такой прибор в результате испытаний показал повторяемость и разрешение измерений в 2 микрона. Каждый прибор был оборудован предварительно откалиброванным цифровым датчиком температуры и влажности, позволяющим проводить измерения температуры с точностью до 0,01 °С и влажности с разрешением 0,05 %. Данный прибор, помимо собственно измерений этих параметров, используется для автоматической температурной коррекции благодаря применению в качестве измерительной ленты материала с заведомо известным коэффициентом теплового расширения.

Каждый такой прибор может работать как автономно, сохраняя результаты измерений на встроенную карту памяти формата microSD, так и в связке с беспроводным дата-логгером, координирующим работу сети таких устройств и отправляющим данные в автоматическом режиме на сервер в сети Интернет.

После натурных испытаний было решено использовать для материала измерительного кольца сплав Ni 200 с коэффициентом теплового линейного расширения $13,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Благодаря этому удалось сделать результаты измерения менее зависимыми от внешних факторов.

Для стабильной передачи данных дата-логгер и датчик использует протокол ZigBee на частоте 2,4ГГц. Данный стандарт позволяет создать гибко конфигурируемые программно-аппаратные решения.

Для испытаний в данном материале использовался один автоматический кольцевой дендрометр в автономном режиме (рис. 1).



Рис. 1. Экспериментальная версия прибора

Прибор может работать с microSD-картами любого объема. Благодаря этому у него достаточно автономной памяти для хранения результатов измерений с довольно маленьким интервалом измерений – 5 минут.

После разработки прибора он был подвергнут калибровке с помощью предварительно поверенного измерительного стенда ETALON POLO, TESA TECHNOLOGY. Коэффициент корреляции данных, полученных с помощью данного прибора и эталонного, составил $r^2=0,998$; $p < 0,00001$; $n=50$ (рис. 2).

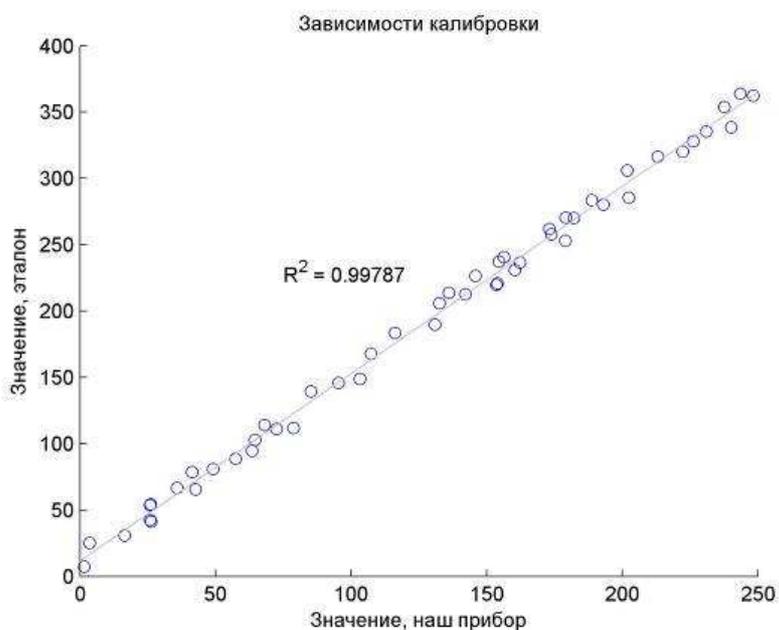


Рис. 2. График сопоставления значений при калибровке

Для получения достоверных и точных результатов при работе кольцевых дендрометров должны быть использованы температурные коррективы [2]. Именно для этого в приборе использовался датчик температуры и влажности так же, как и материал с известным температурным коэффициентом расширения для измерительного кольца.

Для обеспечения измерений с точным временем, а также определения его местоположения (учитывая возможные кражи в лесу) комплекс имеет встроенный приёмник сигналов спутникового позиционирования Глонасс и GPS.

Данный прибор был протестирован в реальных условиях эксплуатации в горах Santa Catalina Mountains, Tucson, AZ, USA. Дендрометр был размещен на сосне желтой и настроен на измерения каждые 5 минут.

Для проверки точности измерений температурного датчика в реальных условиях сравнили полученные результаты с результатами размещенной в радиусе 10 метров от дендрометра откалиброванной метеостан-

ции, установленной на мачте, предназначенной для контроля атмосферных явлений (Mt Bigelow Eddy Correlation Tower). Координаты вышки: широта – 32° 25' 00" северной широты; долгота – 110° 43' 31,85" западной долготы. Данные были любезно предоставлены Greg Barron-Gafford, The University of Arizona.

Были получены коэффициенты корреляции 0,97 на минимальных и 0,94 на максимальных суточных температурах (рис. 3). Данные значения могут говорить о хорошей повторяемости результатов измерений в реальных условиях. Меньший коэффициент корреляции на максимальных значениях обусловлен разной солнечной радиацией из-за расположения крон деревьев.

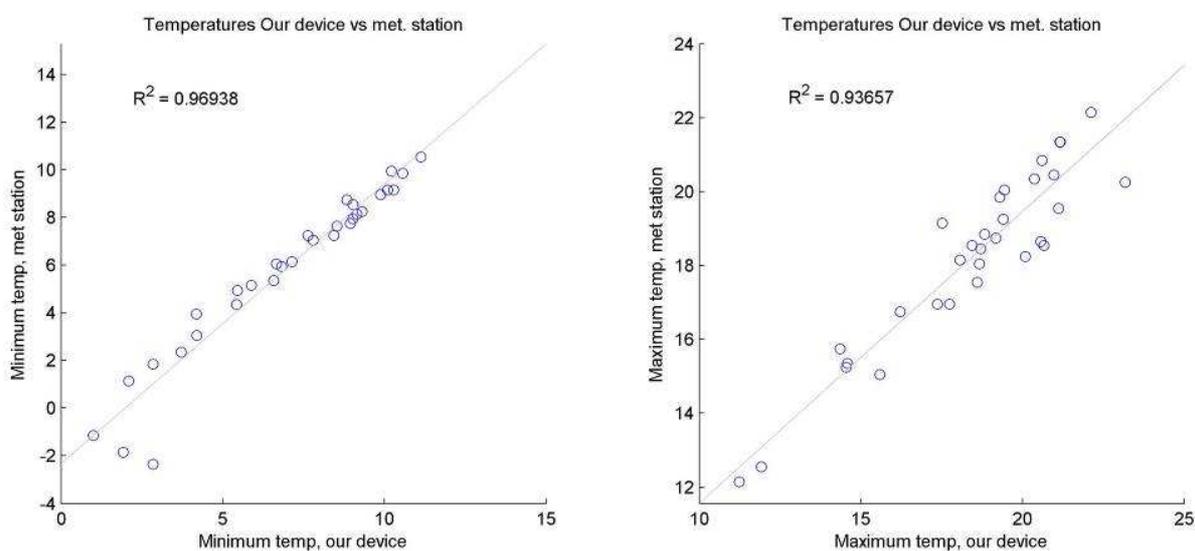


Рис. 3. Коэффициент корреляции между данными, полученными устройством и метеостанцией на минимальных и максимальных суточных температурах

На рис. 4 изображены данные, полученные с помощью экспериментального дендрометра, а также изменения диаметра ствола дерева, температура и влажность. Данные получены в июне – июле 2013 года.

Авторами были подсчитаны значения z-индекса для данных дендрометра, которые были сопоставлены с измеренным на метеостанции содержанием CO_2 и давлением атмосферного воздуха (рис. 5).

Заметно выделяются два события – незначительные осадки 6 мая и существенные колебания CO_2 и температуры воздуха 10 мая.

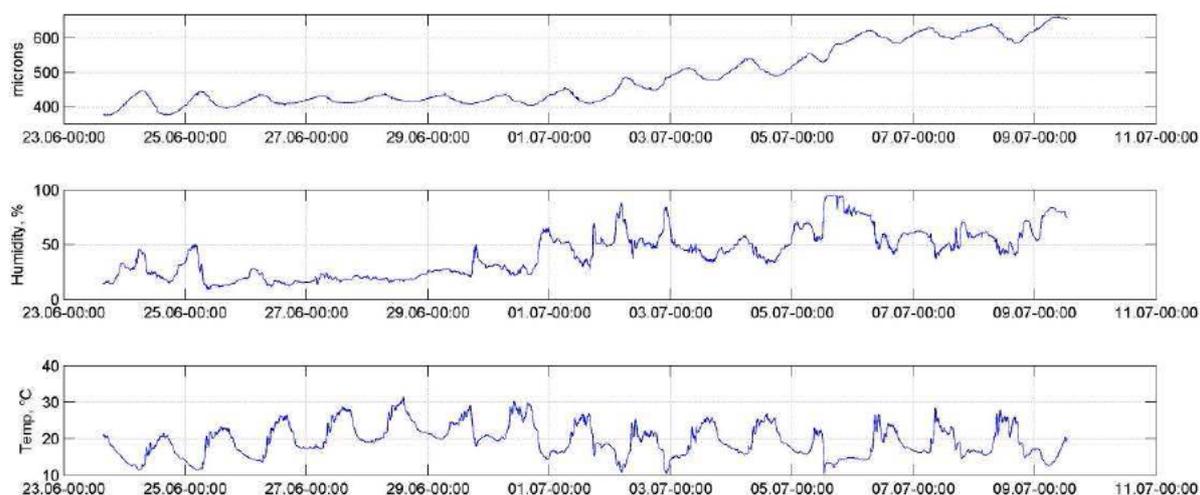


Рис. 4. Величина прироста, температура и влажность, измеренные с помощью прибора

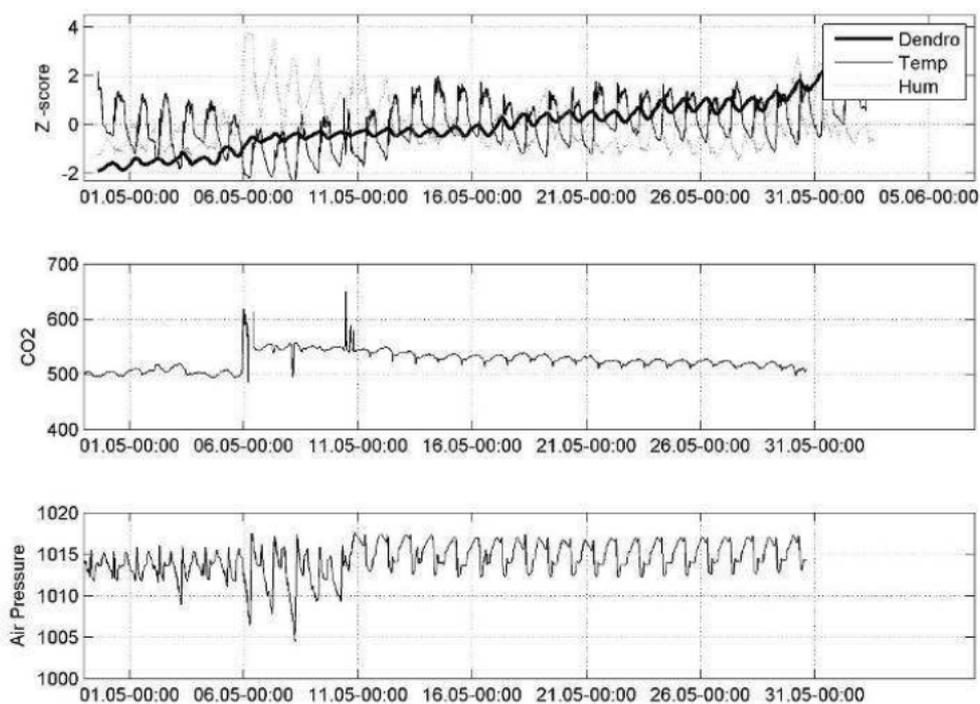


Рис. 5. Данные дендрометра, CO₂ и атмосферное давление

Погодные изменения 10 мая – в концентрации CO₂, температуре и явные сокращения диаметра дерева примерно на 3 микрона были вызваны сильным ветром и меняющимися погодными фронтами (рис. 6).

Опытная эксплуатация дендрометра продолжалась около 3 месяцев в реальных условиях под воздействием разных типов климата – от сухого жаркого для муссонных дождей. Точность и стабильность работы прибора показали его перспективы для развития и использования в подобных измерениях.

Данные прибора хорошо коррелировались с заранее проверенными средствами измерений.

Результаты работы дендрометра и сравнение ассоциированных данных о движении потока соков в дереве и метеорологических условий показывают синхронную реакцию на изменения среды и предоставляют интерес для будущего анализа режимов внутренних процессов, происходящих в деревьях.

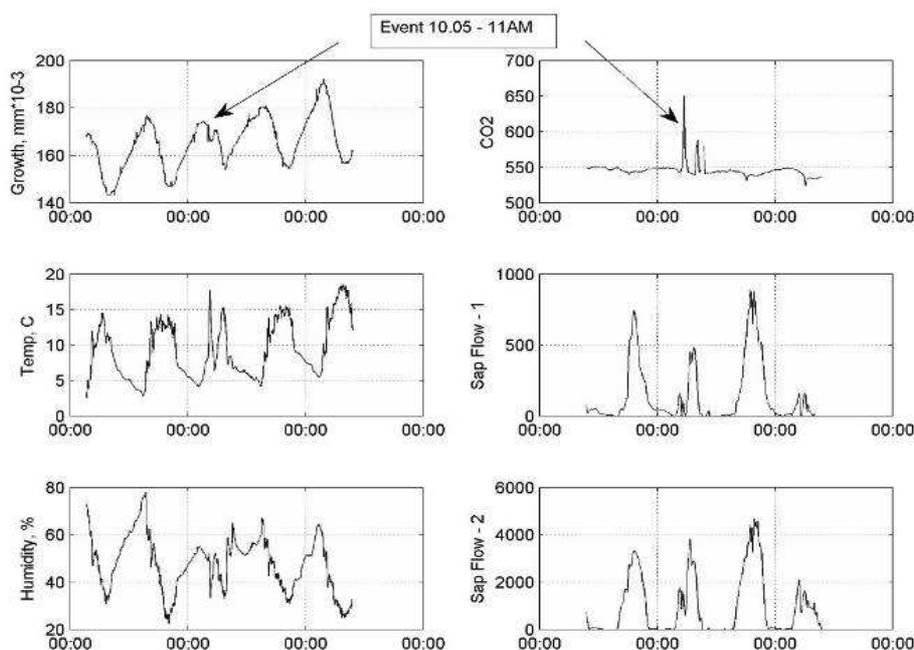


Рис. 6. События 10 мая 2013 года, 11 часов утра

Данный прибор имеет потенциал для эксплуатации в качестве станции автономных непрерывных измерений, может проводить контроль различных параметров на опытных участках либо использоваться для мониторинга работы лесной отрасли.

Выводы. Получаемые в результате работы прибора комплексные данные дают возможность для разделения интегрального сигнала на составляющие, что позволит получить зависимости изменчивости восходящих и нисходящих потоков сока внутри стволов деревьев от изменений внешних условий.

Список литературы

1. Wimmera R., Downesb G.M., Evansc R. High-resolution analysis of radial growth and wood density in *Eucalyptus nitens*, grown under different irrigation regimes // *Annals of Forest Science*. 2002. V. 59. № 5–6. P. 519–524.

2. Bormann F.H., Kozlowski T.T. Measurements of tree growth with dial gage dendrometers and vernier tree ring bands // *Ecology*. 1962. V. 43. P. 289 – 294.

3. Clark N.A., Wynne R.H., Schmoltd D.L. A review of past research on dendrometers // *For. Sci.* 2000. V. 46. №.4. P. 570–576.

4. Parker R.C., Matney T.G. Comparison of optical dendrometers for prediction of standing tree volume // *South. J. Appl. For.* 1999. V. 23. № 2. P. 100–107.

Рубцов Илья Николаевич, асп., 3507777@gmail.com, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа

*FIELD TESTING OF A SELF-DEVELOPED AUTOMATIC BAND DENDROMETER
WITH DIGITAL MEASURING UNIT*

I.N. Rubtsov

With a help of self-developed automatic autonomous band dendrometer we trying to find a way to separate the process of seasonal growth dynamics of tree trunks into components and to analyze the mechanisms of external influence on each of them. This article is about the results of testing newly developed automatic dendrometric system on ponderosa pine and comparing its data with different meteorological data.

Key words: dendrometer, digital highly sensitive sensor, ascending and descending flows of substances in the trunks of woody plants, metrological data, changing diameter of the stem.

Rubtsov Ilya Nikolaevich, postgraduate, 3507777@gmail.com, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ОБРАБОТКА И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.932.1

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ ПИКСЕЛЕЙ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ КАРТ ПО ТИПАМ ОБЪЕКТОВ

В.С. Тарасян, Н.В. Дмитриев

Рассмотрены методы сегментации множества пикселей топографических карт по типам объектов в решении проблемы построения геоинформационных систем местности. В качестве методов для сравнения были выбраны метод кластеризации k -средних, модификация метода Кэнни, метод искусственных нейронных сетей и ручной метод в качестве эталонного. Эксперимент проводился автоматически при помощи разработанных программных средств с помощью гиперпараметрической оптимизации методов. При обработке фрагмента топографической карты получены цифровые изображения изолиний и отметок высот, числовые параметры качества методов. Наилучшее качество достигается при использовании метода искусственных нейронных сетей, который рекомендуется для сегментации множества пикселей в решении поставленной задачи.

Ключевые слова: топографические карты, методы сегментации, кластеризация, детектор Кэнни, искусственные нейронные сети.

Стремительное расширение экономических связей между регионами России и странами ближнего зарубежья, обусловленное развитием промышленных и торговых отношений, привело к осознанию того, насколько оптимально происходит строительство тех или иных объектов логистической и транспортной инфраструктур [1]. Одним из наиболее актуальных и действенных способов на этапе проектирования является использование геоинформационных систем в качестве систем поддержки принятия решения [2]. Геоинформационные системы позволяют хранить, анализировать и визуализировать пространственные данные, полученные на основе реальной местности. Чтобы получить эти данные, авторами были выбраны топографические карты как содержащие наиболее полную и точную информацию.

Топографические карты представляют собой карты с подробным указанием опорных геодезических пунктов, рельефа, грунта, растительности, гидрографии, хозяйственных и культурных объектов, дорог, коммуникаций и других объектах местности. За каждым определённым типом объекта закреплено правило его изображения: форма, цвет, положение, текстура и т.д. Каждый объект может иметь двумерную (поля, озёра), линейную (коммуникации, изолинии) или точечную (цифры, символы и идеограммы) структуру. Для получения геоинформационной системы необходимо разделить топографическую карту по функциональным слоям, что является непростой задачей, так как часто возникают ситуации пересечения нескольких объектов сразу, т.е. топографические карты являются сложными не только с точки зрения структуры, но и с точки зрения топологии [3, 4].

Так как все объекты карт отличаются между собой, прежде всего, цветом, то основной целью исследования было изучение методов сегментации множества пикселей цифровых изображений и определение лучшего в рамках работы с топографическими картами.

Проблема преобразования топографической карты в геоинформационную систему стояла бы не так остро, если бы карты представляли собой векторные изображения, а не растровые. В векторных изображениях все объекты являются математически описанными геометрическими элементами, такими, как точки, линии, многоугольники и т.д., которые могут быть как сгруппированы, так и нет. В растровых изображениях как таковых объектов нет: изображение является двумерной матрицей пикселей, за которыми закреплён только определённый цвет.

Так как целью авторов является построение геоинформационной системы на основе отсканированной топографической карты, то, прежде всего, необходимо выполнить сегментацию множества пикселей между несколькими типами объектов, такими, как пиксели изолиний, пиксели водных объектов, пиксели определённых почв и т.д. Такое разделение можно сделать согласно правилу построения топографических карт, причём определяющей характеристикой является цвет объектов, так как объекты одной функциональной группы либо имеют одинаковый цвет, либо отличаются оттенками одного цвета. После сегментации необходимо будет применять различные методы векторизации растровых изображений, например, для преобразования изолиний в сплайны [5].

Каждый пиксель на растровом изображении, как уже говорилось ранее, определяется только своим цветом, выраженным в цветовых координатах пространства RGB , но этот цвет не является стандартным (взятым из некоторого заранее известного набора), так как при сканировании происходит дискретизация уровней цвета с некоторой погрешностью. Реаль-

ная карта может быть потёртой, выцветшей, пожелтевшей или потемневшей, сам пиксель может лежать на границе нескольких объектов. Всё это приводит к тому, что пиксель можно описать при помощи формулы

$$P = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot C_i + E,$$

где P – вектор цвета пикселя в пространстве RGB ; n – количество типов объектов карты; C_i – вектора цветов типов объектов топографической карты; E – вектор зашумлённости (может иметь отрицательные координаты); ω_i – весовые коэффициенты при векторах цветов.

В общем случае примерно знают вектора цветов для всех типов объектов топографических карт (на разных картах они могут отличаться, так как не существует строгого стандарта на их выполнение), но не знают вектор зашумлённости и весовые коэффициенты. Поэтому необходимо реализовать процедуру, которая распределяла бы множество пикселей карты между основными функциональными типами объектов.

Как известно, общего решения задачи сегментации множества пикселей цифровых изображений не существует, но разработаны некоторые общие методы, которые и можно применить в данной задаче.

Прежде всего, укажем прямой способ сегментирования множества пикселей – ручной, так как будут использоваться его результаты в качестве эталонных для сравнения с другими методами и определения критериев качества. Для этого была проведёна непосредственная обработка фрагмента топографической карты.

Среди автоматических методов выделяется метод кластеризации k -средних, основанный на цветовом разделении изображений на k кластеров, его алгоритм приведён на рис. 1, а. Данный метод очень хорошо работает на выделении двумерных объектов, так как среднее цветовое расстояние между пикселями одного функционала – небольшое число, то есть легко выставить пороговое значение, шумы легко подавляются [6]. Но данный метод может плохо себя проявить при работе с линейными объектами, так как при их сканировании получаются размытые кривые, и выставить однозначный порог уже не получится.

Поэтому для линейных объектов используются специальные методы выделения краёв или границ. В данном случае оценивается не вектор пикселя в цветовом пространстве, а перепад яркости по направлениям, то есть градиенты. К таким методам относятся операторы первого порядка: Собеля, Прюитта, Робертса и детектор границ Кэнни, операторы второго порядка, метод согласованности фаз [7]. Последние два типа методов не подходят для решения исследуемой задачи, так как некорректно работают на зашумлённых изображениях. Из методов первого порядка наиболее успешным является модификация детектора границ Кэнни (рис. 1, б). Оригинальный детектор содержит операцию сглаживания с помощью фильтра

Гаусса, что привело бы к потере качества вследствие высокой информационной плотности карт (из-за маленьких размеров объектов, несущих информацию).

Детектор Кэнни определяет любые границы, поэтому для того, чтобы выделить необходимые границы, необходимо выполнить его только для определённого цветового пространства, радиус которого выбирается значительно большим, чем расстояние в методе k -средних.

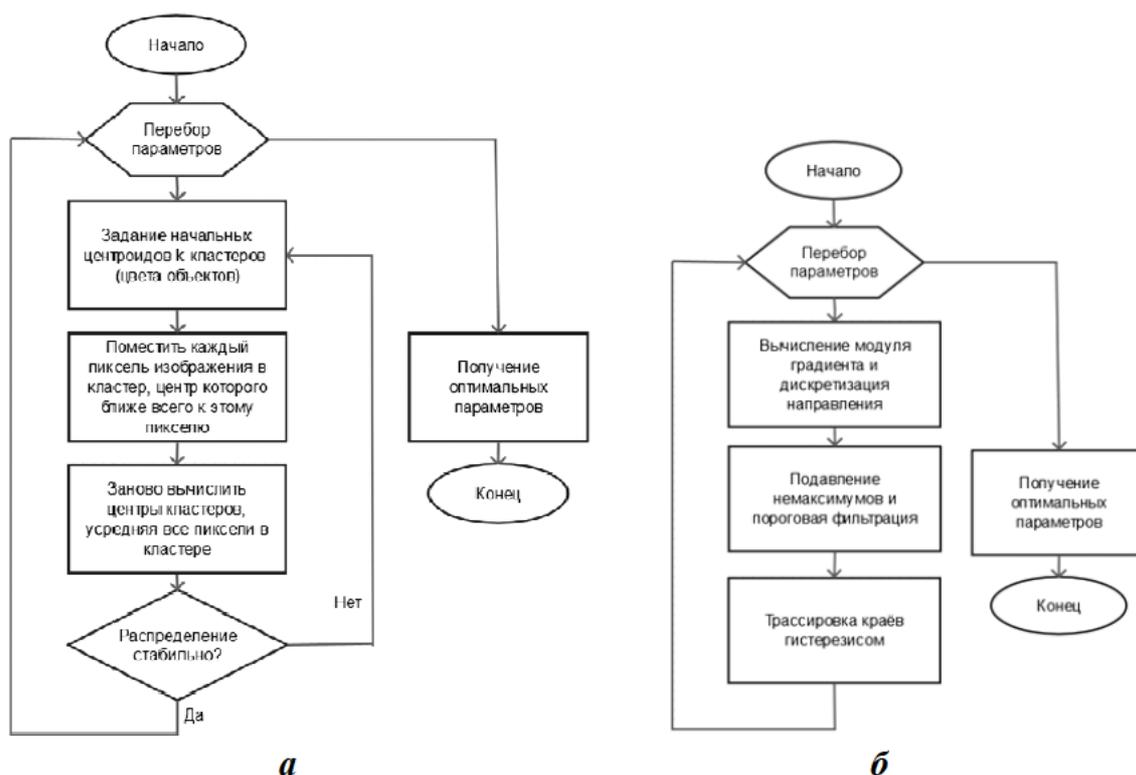


Рис. 1. Блок-схема алгоритмов: а – кластеризации k -средних; б – модификации метода Кэнни

Кроме данных методов, при работе с изображениями часто применяются искусственные нейронные сети (ANN) как один из основных методов машинного обучения. ANN могут быть использованы для распознавания любых типов объектов, как двумерных, так и линейных [3]. ANN являются одним из самых медленных из представленных методов, но обладающим наибольшими возможностями и масштабируемостью. Алгоритм представлен на рис. 2.

Кроме того, после данных процедур сегментирования необходимо выполнить морфологическую постобработку полученных множеств пикселей с помощью таких операций, как дилатация, эрозия, замыкание и размыкание, для того, чтобы максимально нивелировать воздействие шумов: избавиться от разрывов изолиний и нарастить области до соприкосновения [5].

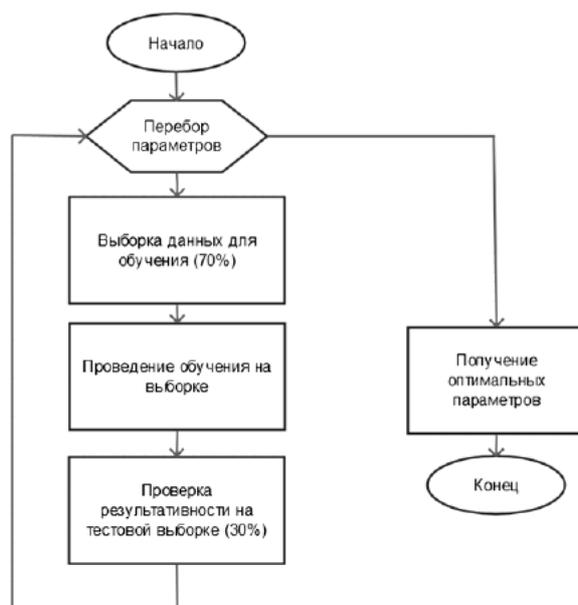


Рис. 2. Алгоритм искусственной нейронной сети

Одной из проблем при программной реализации данных методов выступили критерии качества, описанные ниже. Каждый из представленных методов обладает набором параметров, влияние которых невозможно оценить теоретически, поэтому для достижения наивысшей эффективности над каждым методом была осуществлена гиперпараметрическая оптимизация с использованием сетки поиска (*Grid Search*) [8]. Параметры, по которым была осуществлена параметризация, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры оптимизации методов сегментации

Название метода	Параметры
Кластеризация k -средних	Количество кластеров, количество итераций алгоритма, минимальное расстояние между центрами кластеров
Модификация метода Кэнни	Верхние и нижние пороги срабатывания, радиус цветового пространства распознаваемого объекта
Искусственная нейронная сеть	Тип <i>ANN</i> , количество нейронов во вложенном слое, передаточная функция нейронов

На выходе всех представленных методов – двумерная булева матрица, определяющая, принадлежит ли пиксель к исследуемому типу объектов топографической карты или нет. Поэтому создадим два критерия оцен-

ки качества рассматриваемых методов согласно теории математической статистики: по ошибке первого рода (ложное срабатывание) и второго рода (пропуск срабатывания). В качестве критериев будем рассматривать отношение ошибочных пикселей (по тому или иному роду) к количеству уже определённых к типу ручным методом.

Для случаев выделения двумерных объектов ошибки первого и второго рода оказываются на несколько порядков меньшими, чем для линейных и точечных объектов. Поэтому для оценки качества методов были исследованы объекты, отвечающие за функционал отражения высоты местности: изолинии и отметки высот коричневого цвета.

В качестве наглядного изображения фрагмента топографической сети было выбрано изображение, представленное на рис. 3. Полученные результаты преобразования после выполнения гиперпараметрической оптимизации показаны на рис. 4. В табл. 2 в увеличенном виде представлены распознанные изолинии и числа для более наглядного просмотра, а в табл. 3 приведены численные показатели качества: критерии ошибок и быстродействие (в относительном времени выполнения взято за единицу время выполнения модификации детектора Кэнни).

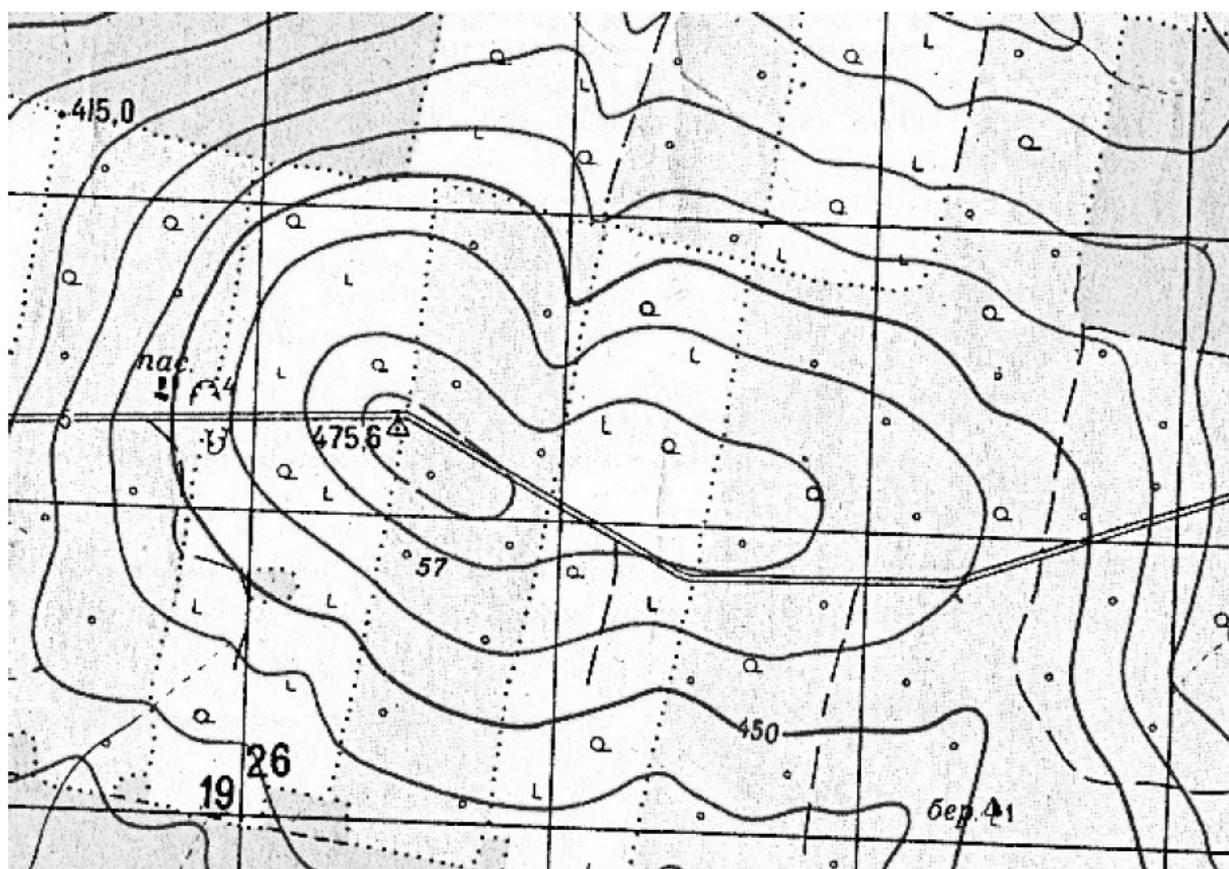


Рис. 3. Фрагмент реальной оцифрованной топографической карты

Таблица 2

**Сравнение методов сегментации множества пикселей:
увеличенные изображения**

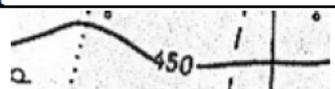
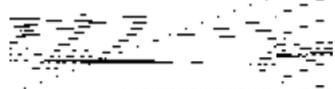
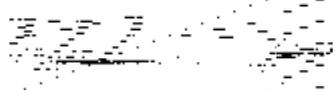
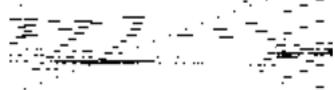
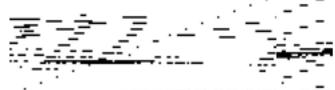
№	Название метода	Изображение изолинии и числа
1	Оригинальное изображение	
2	Ручной	
3	Кластеризация k-средних	
4	Модификация метода Кэнни	
5	Искусственная нейронная сеть	

Таблица 3

**Сравнение методов сегментации множества пикселей:
численные параметры**

Название метода	Ошибки первого рода, %	Ошибки второго рода, %	$T_{\text{вып.}} \text{ с}$	$T_{\text{вып. отн.}} \text{ раз}$
Ручной	-	-	~ 600	~ 4000
Кластеризация k-средних	2	27	0,15	1,0
Модификация детектора Кэнни	5	18	0,23	1,5
Искусственная нейронная сеть	6	7	2,56	17,1

В данной статье рассматривались методы сегментации множества пикселей между типами объектов топографических карт. Согласно данным, полученным в результате эксперимента, было определено, что лучшим методом для выделения линейных объектов с точки зрения качества является метод искусственной нейронной сети: с незначительным увеличением ошибок первого рода происходит значительное уменьшение ошибок второго рода. Этот результат оказался предсказуемым, так как топографические карты представляют собой сложные структурные объекты, для преобразования которых необходимо использовать сложные модели с большим количеством параметров, что и обеспечивается искусственной нейронной сетью. Но это не означает, что другие методы совсем неприме-

нимы в задаче сегментации множества пикселей топографических карт: они могут использоваться при выделении крупных двумерных объектов, при этом скорость работы будет выше.

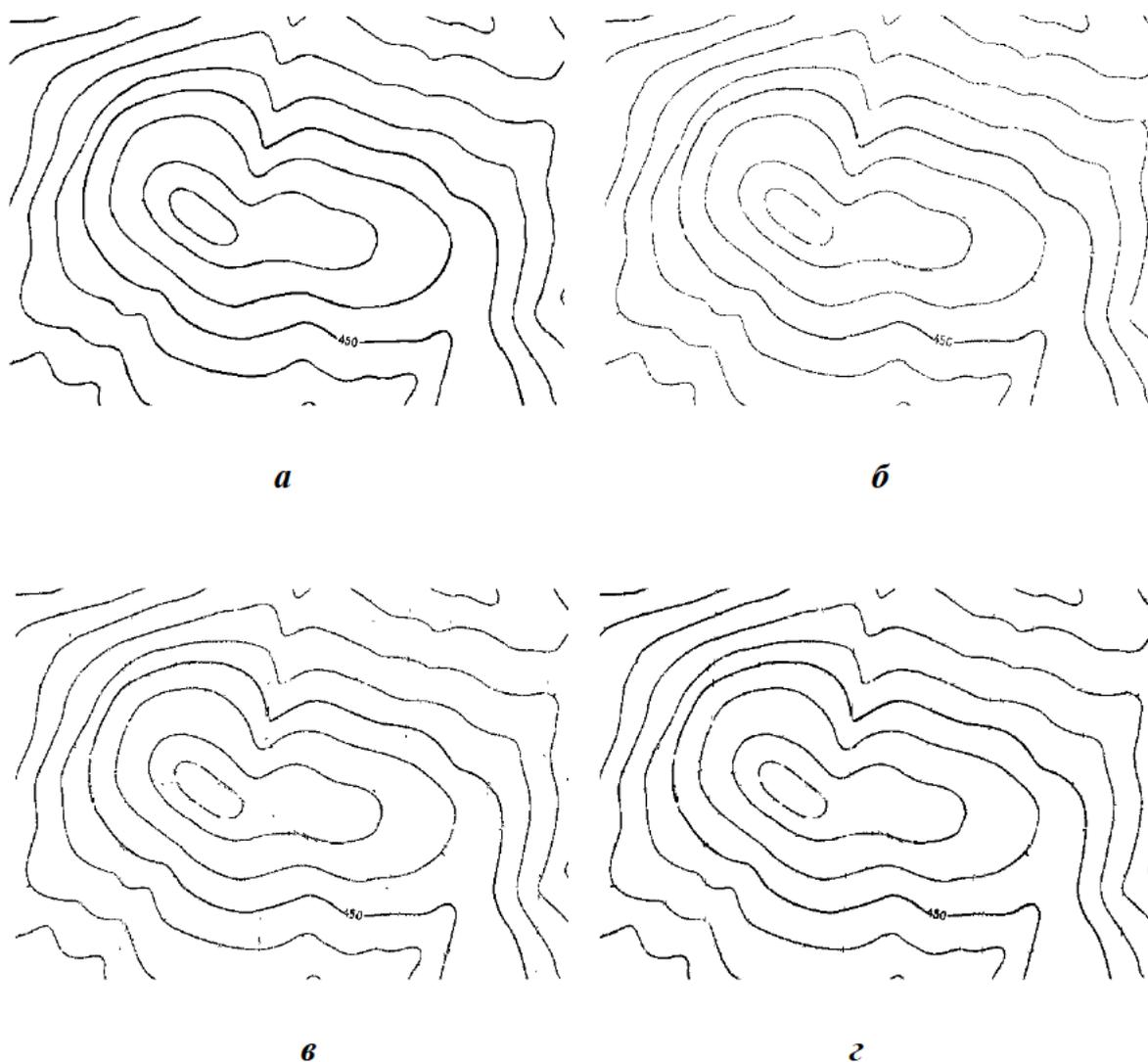


Рис. 4. Результаты выполнения сегментации множества пикселей различными способами: а – ручная сегментация; б – классификатор *k*-средних; в – модификация детектора Кэнни; г – искусственная нейронная сеть

В дальнейшем полученные сегментированные пиксели можно использовать для распознавания цифр, группировки их в числа, объединения их с изолиниями и т.д., осуществить векторизацию исходного изображения и разделить его по функциональным слоям. Полученную геоинформационную систему можно использовать для оптимального проектирования объектов транспортной и логистической инфраструктур, например, рассчитывать оптимальные точки пересечения транспортных путей.

Список литературы

1. Zhuravskaya M., Tarasyan V. Forming of the regional core transport network taking into account the allocation of alternative energy sources based on artificial intelligence methods // *Transport Problems*. 2014. V. 9. N 4. P. 121 – 130.
2. Тарасян В. С., Дмитриев Н. В. Система автоматизированного построения виртуальной модели местности по топографической карте // *Молодежь в науке: Новые аргументы: сборник научных работ II Международного молодежного конкурса*. Ч. I. 2015. С. 62 – 65.
3. Тарасян В.С., Дмитриев Н.В. Интеллектуальная система анализа и преобразования топографических карт [Электронный ресурс] // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 2; URL: www.scienceeducation.ru/12921614 (дата обращения: 14.09.2015).
4. Ebi N., Lauterbach B., Besslich Ph. Automatic data acquisition from topographic maps using a knowledge-based image analysis system // *ISPRS92 IV-B4*. P. 655 – 663.
5. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. 616 с.
6. A novel fast image segmentation algorithm for large topographic maps / Miao Qiguang, Xu Pengfei, Liu Tiange, Song Jianfeng, Chen Xiaojiang // *Neurocomputing*. 2015. V. 168. P. 808 – 822.
7. Deshmukh Nilesh K., Kurhe Ajay B., Satonkar Suhas S. Edge Detection Technique for Topographic Image of an Urban/Peri-Urban Environment Using Smoothing Functions and Morphological Filter // *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 2011. Vol. 2 (2). P. 691 – 693.
8. Bergstra James J, Bengio Yoshua. Random Search for Hyper-Parameter Optimization // *Journal of Machine Learning Research* 13. 2012. P. 281 – 305.

Тарасян Владимир Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, доц., зав. кафедрой, vtarasyan@gmail.com, Россия, Екатеринбург, Уральский государственный университет путей сообщения,

Дмитриев Никита Владимирович, асп., dmitrievnikita13@gmail.com, Россия, Екатеринбург, Уральский государственный университет путей сообщения

COMPARISON OF METHODS FOR SEGMENTING PIXELS OF TOPOGRAPHIC MAPS BY OBJECTS TYPES

V.S. Tarasyan, N.V. Dmitriev

Methods for segmenting sets of pixels of topographic maps by object types in solving problem of formation geographic information system are considered. There are methods for comparison such as k-means clustering, modification of Canny detector, artificial neural network and manual method as a benchmark. Experiment of verification of methods is performed automatically using implemented software with hyperparameter optimization. The main results are produced from fragment of topographical map digital images of contours and high marks and numerical values of quality criteria. Experiment shows the best quality is achieved by using intellectual methods of artificial neural networks and it's recommended for segmenting of pixels at formation of geographic information system.

Key words: topographic map, segmentation methods, clustering, Canny detector, artificial neural network

Tarasyan Vladimir Sergeevich, candidate of physical mathematical sciences, docent, head of chair, vtarasyan@gmail.com, Russia, Ekaterinburg, Ural State University of Railway Transport,

Dmitriev Nikita Vladimirovich, postgraduate, dmitrievnikita13@gmail.com, Russia, Ekaterinburg, Ural State University of Railway Transport

УДК 336.74

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ПРИЗНАКИ БАНКНОТ: ПУБЛИЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В.А. Селищев, Я.Р. Голубничая

Рассматриваются основные визуальные защитные элементы банкнот, представляющие собой первый уровень проверки их подлинности и предназначенные для распознавания населением без использования специальных технических средств.

Ключевые слова: водяной знак, защитная нить, защитные волокна, микроперфорация, голограмма, способы печати, микропечать, скрытое изображение, цветопеременные краски.

Подделывать денежные знаки стали сразу по мере их появления, поэтому на протяжении веков ведется постоянная борьба с фальшивомонетничеством, которое наносит существенный экономический ущерб. Защитные признаки (элементы) банкнот – это трудновоспроизводимые графические или технологические элементы, препятствующие их подделке или фальсификации. Общее количество защитных элементов в банкноте может быть около 100 или больше.

Банкноты – это особый полиграфический продукт, имеющий несколько уровней защиты. Защитные признаки первого уровня (*публичные*) ориентированы на население и, как правило, распознаются органолептически. Элементы второго уровня (*машиночитаемые*) предназначены

для кассовых работников и систем обработки наличности и предполагают использование детекторного оборудования. Третий уровень – это признаки, которые контролируются центральными банками и известны только узкому кругу экспертов.

Защищать банкноты от подделки начинают еще на этапе разработки дизайна, используя специальные программы (рис. 1). В таблице приведены публичные защитные признаки, включаемые в субстрат на стадии изготовления банкнотной подложки и создаваемые в процессе печати.

Публичные признаки подлинности банкнот

Защитный элемент	Описание	Характеристика подделок
1	2	3
Технологическая защита		
Водяной знак	Изображения, полученные в процессе отлива бумаги. Видимы на просвет	Надпечатка, надрисовка, давление, пропитка маслоподобными веществами, гравировка
Защитные волокна, конфетти	Тонкие синтетические или хлопковые волокна (4-8 мм), вводимые в бумажную массу. Под микроскопом видно специальное сечение профиля	Рисование, наклейка, нанесение волокон на поверхность подложки
Защитная нить	Узкая полимерная полоска, вводимая в бумажную массу. На просвет выглядит черной или полупрозрачной полосой (скрытая нить). «Ныряющая» нить видна в проходящем и отраженном свете	Наклейка, надпечатка металлизированной краской, дорисовка, тиснение фольгой
Микроперфорация	Микроотверстия, созданные при помощи лазерной перфорации. Поверхность бумаги в месте расположения микроотверстий гладкая. Под большим увеличением идентифицируется конусообразная форма отверстий	Проколы тонкими иглами (легко выявляется, так как в местах проколов бумага более выпуклая). Подделка с помощью лазера (отверстия всегда большего размера, чем нужно)
Голографические средства (голограммы, кинеграммы)	Изображения, выполненные на полимерных носителях с использованием технологии, базирующейся на оптическом эффекте дифракционной решетки. При изменении угла зрения видны разные изображения	Припрессовка фольги, использование металлизированной краски. Сложно подделать
Полиграфическая защита		
Способы печати (типографский, металлографский, трафаретный, офсетный, орловский эффект, ирисовый раскат)	Характеризуются особенностями формирования изображения и нанесения его на бумагу. Используются для создания визуальных и рельефных признаков подлинности	Тиснение, термография - имитация металлографии. Репрография (принтеры, копировально-множительные аппараты). Трафаретная, цифровая печать - имитация орловской печати и ирисового раската
Гильоширные элементы	Сложные узоры из переплетающихся линий. Определяются математическими формулами	Трудно воспроизводимы на копировальной технике

1	2	3
Микропечать (микротекст)	Шрифт мельче, чем воспроизводит копировальная техника (около 0,25 мм). Читается при увеличении	Репрография, несложная полиграфия (со значительными искажениями)
Специальные растры	Использование точек растра необычных форм, в том числе мелких графических элементов (букв, цифр, изображений). Визуализируются при увеличении	Воспроизведение крайне сложно
Скрытые и совмещающиеся изображения	Участок фонового рисунка, выполненный штрихами с определенным направлением. Фрагменты совмещающихся изображений печатаются на лицевой и оборотной сторонах банкноты. Визуальные эффекты возникают при перемене угла зрения	Почти невозможно качественно подделать – нет точного совмещения, отсутствует необходимый визуальный эффект
Физико-химическая защита		
Оптически изменяемые, иридесцентные, металлизированные краски	Типографская краска, изменяющая цвет при перемене угла зрения и освещения. Металлизированные краски изменяют интенсивность блеска	Цветное копирование, сканирование, использование лаков, фольги. Эффект изменения цвета на подделках отсутствует

Нити бывают *с текстом и без текста, металлизированные, прозрачные, обладающие магнитными свойствами, люминесцирующие* в ультрафиолетовых лучах, голографические, имеющие оптически переменные и кинетические эффекты.

С помощью *микроперфорации* (рис. 1, г) в банкноте прожигаются микроотверстия, образующие определенный рисунок, как правило, цифровое изображение номинала или герб.

Голографические средства (рис. 2) являются оптически изменяемыми элементами – OVD (Optically Variable Device). При перемене угла освещения происходит замещение изображений, которые бывают однопозиционными объемными (голограммы) или многопозиционными (кинеграммы) [3].

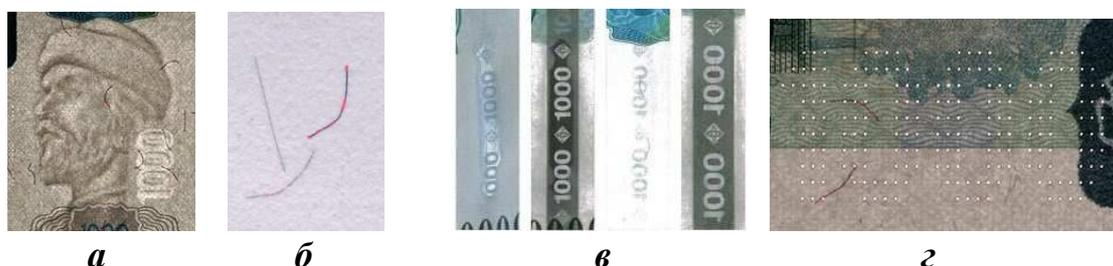


Рис. 1. Признаки подлинности на российских банкнотах:
а – водяные знаки (полутоновый и филигранный); б – защитные волокна; в – защитная нить в отраженном и проходящем свете; г – микроперфорация

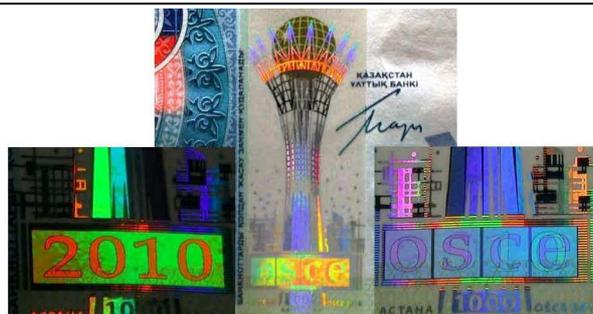


Рис. 2. Голограмма на казахстанской памятной банкноте

В процессе защищенной полиграфии используются различные *способы печати*, особенно важными с точки зрения создания защитных признаков являются металлография, орловская и ирисовая печать. Изображения, выполненные металлографией (рис. 3), имеют характерный насыщенный цвет и рельефность, которая легко распознается на ощупь [4].

Орловская печать дает изображения с резким переходом цветов, что невозможно воспроизвести обычными полиграфическими способами. Ирисовый раскат позволяет получать плавные переходы цвета без четкой границы. Специалисты российской фабрики «Гознак» совместно с фирмой «КВА Giori» («КВА-NotaSys») смогли добиться как плавных, так и резких переходов цвета в любом направлении, разработав защитный элемент 2D-Iris (рис. 4).

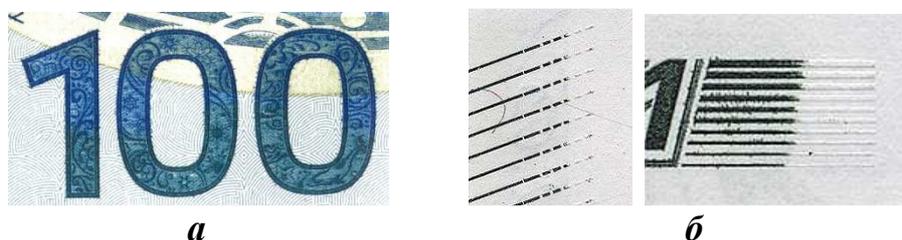


Рис. 3. Металлографская печать на российских банкнотах: а – номинал памятной банкноты; б – рельефные штрихи, переходящие в бескрасочное тиснение



Рис. 4. 2D-Iris на российских банкнотах

Гильоширные элементы (орнаменты, виньетки, сетки) – особый вид штриховой (векторной) графики для создания трудновоспроизводимых и сложных композиций.

Микротексты (рис. 5) могут быть позитивными (темный текст на светлом фоне) или негативными (светлый текст на темном фоне), регулярными (одинаковая высота и ширина штрихов) или с переменной толщиной штрихов [5].

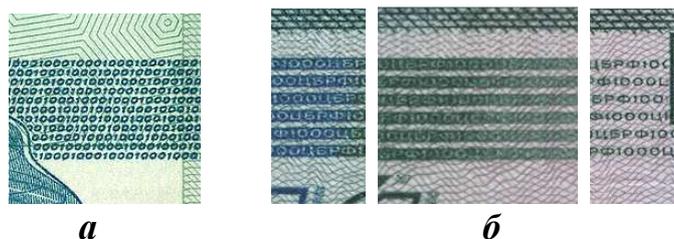


Рис. 5. Микротекст на российских банкнотах: а – позитивный; б – негативный с переходом в позитивный («ЦБРФ1000»)

В качестве полиграфической защиты также используются изображения из мелких графических элементов, созданные при помощи специальных растров (рис. 6). Растр – совокупность микроштриховой структуры, служащей для передачи тонового изображения способом полиграфии [3].

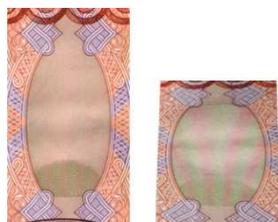


Рис. 6. Использование специальных растров на российских банкнотах

С помощью металлографской печати и ее комбинации с офсетной получают скрытые изображения с оптически переменными эффектами в зависимости от угла зрения или освещения. Кипп-эффект (рис. 7, а) дает светлые изображения на темном фоне или темные на светлом. Скрытый муаровый узор (MVC – Moire Variable Color) – это разновидность защиты от копирования, при котором возникают радужные цветные полосы. При использовании защитного элемента «MVC+» (рис. 7, б) на одном из участков рисунка радужные полосы видны под любым углом, а на другом появляются при наклоне и выглядят продолжением рисунка. Защитный признак НМС (Hidden Moire Colour) дает появление разноцветных фрагментов изображения при наклоне купюры и изменение их окраски при развороте банкноты на 180° (рис. 7, в) [1].



а



б



в

Рис. 7. Оптически переменные эффекты на российских банкнотах: а – кипп-эффект; б – MVC+; в – HMC;

При *PEAK-эффекте* скрытое изображение проявляется в косопадающих лучах. Комплексный признак *MASK* позволяет наблюдать разные изображения в проходящем и в отраженном свете [6].

Фрагменты *совмещающихся изображений* наносятся на обе стороны банкноты и при рассматривании на просвет должны образовать целостный рисунок (рис. 8).



Рис. 8. Совмещающиеся изображения на казахстанских банкнотах

Физико-химическая защита денежных знаков обеспечивается использованием специальных красок. *Оптически изменяемые краски* – *OVI* (Optically Variable Ink) от компании *SICPA* – имеют в своем составе множество тонких пленок, на которых происходит интерференция света. Развитием технологии *OVI* является защитный признак *SPARK* (рис. 9) на основе цветопеременной магнитной краски *OVMi* (Optically Variable Magnetic Ink). При изменении угла зрения, кроме перемены цвета с выраженной трехмерностью изображения, наблюдается динамический эффект [7].

Распознавание *металлизированных изображений* базируется на отражении света от мельчайших чешуек металла, добавленных в краску. Являясь визуальным защитным признаком, краски также служат защитой от копирования.

Изображения, обладающие радужным, «перламутровым» блеском, получают при помощи *иридесцентных красок* (путем добавления частиц, состоящих из множества тонких полимерных пленок). Разработан целый ряд защитных признаков с использованием явления иридесценции (Irisafe, MIRA, FCO Iriseal) [8].



Рис. 9. SPARK на юбилейной банкноте Казахстана

В качестве проверки подлинности полимерных банкнот, которые используются в денежном обращении многих стран, применяются как некоторые традиционные защитные признаки, так и специально разработанные. На стадии производства полимерного субстрата формируются *теневое изображение* (аналог водяного знака), *прозрачное окно* с различными защитными признаками, оптически переменный признак *Latitude* (двусторонняя голограмма в прозрачном окне). Аналогом OVI является *G-Switch*, меняющий цвет при повороте банкноты.

Развитие все более совершенных способов защиты денежных знаков как на бумажной, так и на полимерной основе происходит постоянно. В сфере защищенной печати регулярно появляются технологии, способствующие возникновению нового поколения защитных признаков – с применением микролинз, цветопеременных, голографических и динамических эффектов.

Разработке публичных защитных элементов, в том числе комплексных, отводится особая роль, поскольку они представляют собой первый рубеж борьбы с фальшивомонетничеством. Основные признаки подлинности постоянно совершенствуются (например, современные защитные нити становятся носителями для все большего числа защитных признаков, как публичных, так и скрытых), они сохраняют свою актуальность и эффективность и в сочетании с новыми решениями надежно защищают банкноты от подделок.

Список литературы

1. Банкноты. Признаки подлинности // Центральный банк Российской Федерации [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: www.cbr.ru (дата обращения 17.03.2016).
2. Авдошин В.В. Определение подлинности и платежеспособности денежных знаков: методическое пособие. М.: ИнтерКрим-пресс, 220. 104 с.
3. Ионов В.М. Внимание, деньги! 2008. 60 с.
4. Маресин В.М. Защищенная полиграфия: справочник. М.: Флинта: МГУП им. И. Федорова, 2012. 640 с.
5. Способы защиты документов / ООО «ВИЛДИС». М.: Альварес Паблишинг, 2002. 96 с.
6. Глоссарий по банкнотам // Компания «Регула» [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://regulaforensics.com> (дата обращения 29.03.2016).
7. Защитные технологии современного банкнотного производства. Публичные признаки // Банкноты стран мира. 2011. № 1. С. 12 – 16.
8. Защитные технологии современного банкнотного производства. Публичные признаки // Банкноты стран мира. 2011. № 2. С. 18 – 20.

Селищев Валерий Анатольевич, канд. техн. наук, доц., sel648val@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Голубничая Яна Романовна, студентка, yana_tula@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

BASIC SECURITY FEATURES OF BANKNOTES: PUBLIC ELEMENTS

V.A. Selishev, Y.R. Golubnichaya

The article examines the main visual security features of banknotes, which are the first level of checking their authenticity and are designed for the public to recognize genuine and counterfeit banknotes without special technical means.

Key words: watermark, security thread, security fibers, microperforation, hologram, printing methods, microprinting, latent image, optically variable ink.

Selishev Valeryi Anatolievich, candidate of technical sciences, docent, sel648val@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Golubnichaya Yana Romanovna, student, yana_tula@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА И ИМИТАЦИОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АПТ ДЛЯ ЗАГРУЗКИ-ВЫГРУЗКИ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ НА ТАНКЕРНЫЕ СУДА БЕЗ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

В.С. Палто, С.М. Кабанов, Г.В. Фридлиндер

Рассматривается реализация задачи моделирования позиционирования танкерного судна, автоматизированного подводного терминала и других морских объектов окружающей среды относительно друг друга. Предлагается решение задачи расчёта шланговой линии для погрузки-выгрузки углеводородного сырья. Описаны основные проблемы и способы их решения в рамках визуализации и совмещения с результатами имитационного моделирования при создании программно-вычислительного комплекса.

Ключевые слова: имитационное математическое моделирование, автоматизированный подводный терминал, Unity3D, шланговая линия.

В рамках разработки программного комплекса была проведена опытно-конструкторская работа по теме «Разработка программного обеспечения для реализации комплексной имитационной модели автоматизированного подводного терминала (АПТ) для загрузки-выгрузки углеводородного сырья посредством АПТ на танкерные суда без динамического позиционирования». В результате были сформулированы следующие цели:

разработка программного обеспечения для реализации комплексной имитационной модели элементов автоматизированного подводного терминала;

отработка на стенде технических решений по конструкции АПТ на основе комплексной имитационной математической модели.

Для достижения указанных целей были решены следующие задачи:

создание имитационных математических моделей АПТ, средств погрузки-выгрузки, танкерного судна и окружающей среды;

создание имитационных моделей взаимодействия элементов системы, таких, как

средства погрузки-выгрузки;

танкерное судно и окружающая среда.

Расчёт моделей и их взаимодействие

Система представляет собой сложносвязанную структуру с взаимодействием отдельных её частей через шину обмена данными, соответствующую стандарту IEEE 1516. Моделирование выполняется в одном или нескольких модулях, подключенных к шине обмена данными. Эти модули, называемые федератами, могут обмениваться данными через шину. Тем

самым обеспечивается возможность взаимодействия имитационных моделей друг с другом. Именованный набор приложений федератов называется федерацией. Взаимодействие федерата с шиной осуществляется посредством ТСР/ІР протокола. Каждый отдельный федерат может выполняться на отдельном вычислительном устройстве, благодаря чему обеспечивается возможность распределённого имитационного моделирования.

Система визуализации является частью федерации – федератом визуализации данных. Данные, необходимые для правдоподобной визуализации, поступают от федератов имитационного моделирования в федерат визуализации, представленный отдельным набором программ и плагинов (рис. 1).

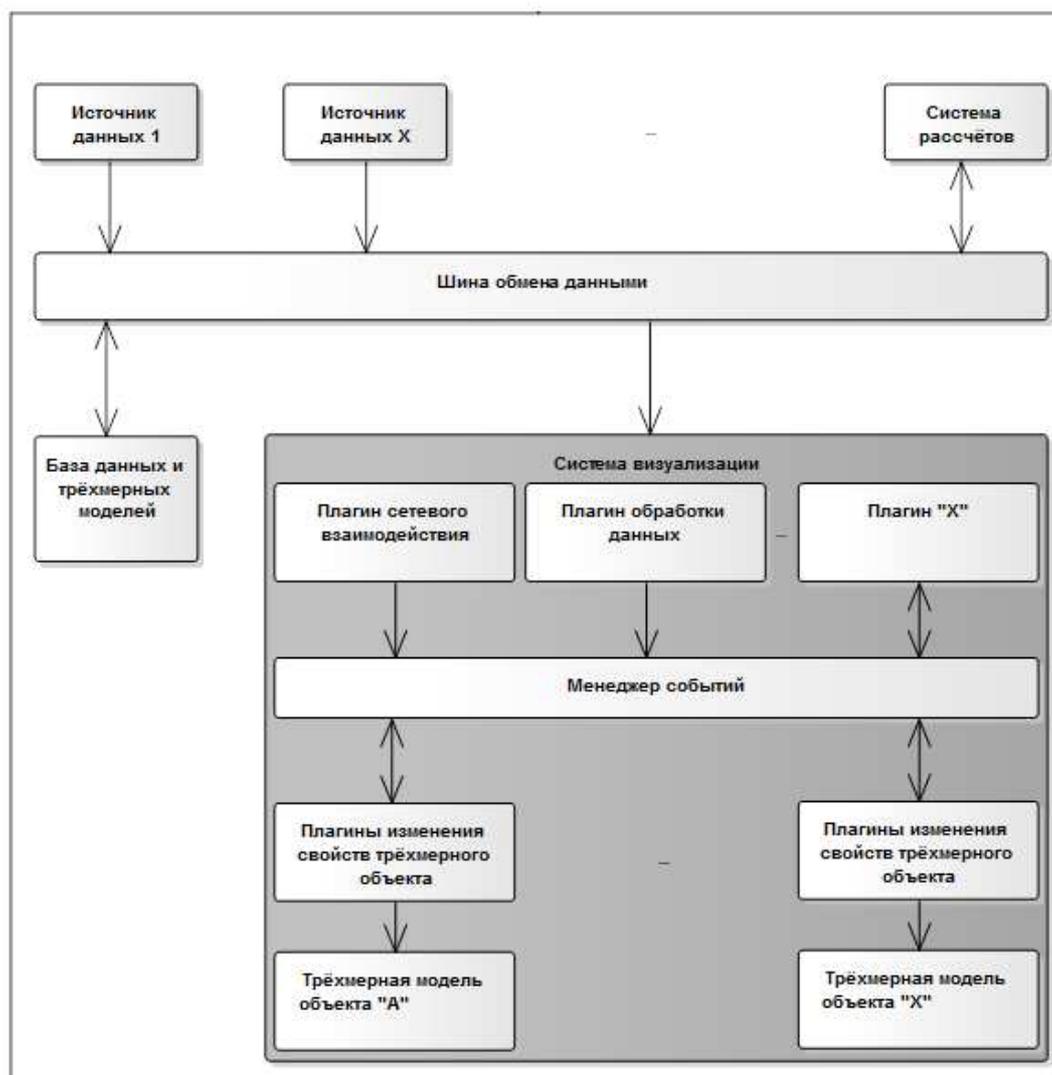


Рис. 1. Схема взаимодействия федератов программного комплекса

Визуализация изменения состояния моделей. Взаимодействие и объединение в единый комплекс осуществляется посредством нескольких федератов системы имитационного моделирования.

В общем случае федераты визуализации можно разделить на следующие основные группы:

федераты управления ходом имитационного моделирования (рис. 2);

федераты математических расчётов, обеспечивающих максимально точное вычисление физико-динамических показателей и данных, используемых в дальнейшем другими федератами (рис. 3);

федерат визуализации данных имитационного моделирования в виртуальной трёхмерной среде.

Для управления процессом имитационного моделирования в системе присутствует федерат запуска и остановки процесса моделирования (рис. 2) и федерат с графическим интерфейсом пользователя (рис. 3). Интерфейс максимально приближен к внешнему виду существующего пульта управления стыковкой.

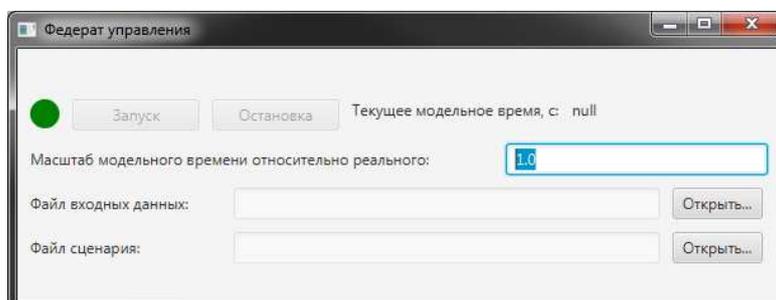


Рис. 2. Федерат запуска и остановки моделирования

С помощью федерата запуска и остановки моделирования пользователь может запустить процесс имитационного моделирования с заданными входными параметрами, а также указать масштаб времени, ускоряя или замедляя скорость моделирования. Изменение скорости моделирования позволяет как сэкономить время при незначительных изменениях модели с продвижением во времени, так и более детально изучать особенности поведения модели в быстропротекающих процессах посредством замедления скорости продвижения времени, устанавливая масштаб времени, меньшей единицы.

Федерат управления стыковкой позволяет оказывать воздействие на процесс имитационного моделирования, изменяя в режиме реального времени состояние моделей и тем самым меняя ход моделирования.

Это позволяет:

изучать ход процесса стыковки;

обучать пользователя правильной последовательности управления процессом стыковки и расстыковки;

моделировать аварийные ситуации и обучать пользователя правильному поведению в случае возникновения аналогичной ситуации в реальности.

Федерация включает модель шланга по перекачке нефтепродуктов. Шланг является сложным физическим объектом, поэтому его моделированием занимается отдельный федерат с вызовом специальных подпрограмм вычисления состояния шланга.

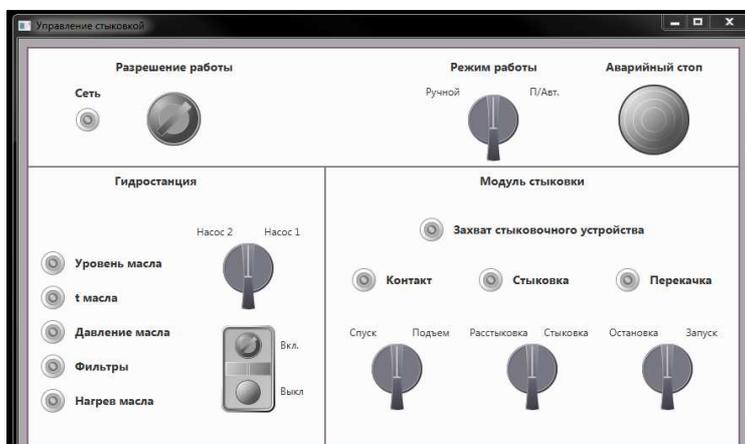


Рис. 3. Федерат управления стыковкой

Федерат взаимодействия отображает расчётные данные натяжения шланговой линии в свободном состоянии и при соединении с танкером. Вычисление этих состояний производится во внешней программе, написанной на языке Python 2.7, и вызывается федератом взаимодействия в момент необходимости этих данных для обеспечения корректного моделирования.

Все результаты моделирования оказывают влияние на основные физические параметры, такие, как положение в пространстве, состояние, скорость и другие. Эти данные поступают в федерат трёхмерной визуализации, где пользователь может оценить состояние модели в интуитивно понятном для него виде – трёхмерной среде (рис. 4).



Рис. 4. Программа визуализации состояния моделей. Вид стыковочного устройства, робота и танкера

В трёхмерной среде присутствуют модели танкера (рис. 5), робота и стыковочного устройства (рис. 4), буя, шланга, плоскость воды и др. (рис. 6).



**Рис. 5. Программа визуализации состояния моделей.
Водная поверхность и танкер**

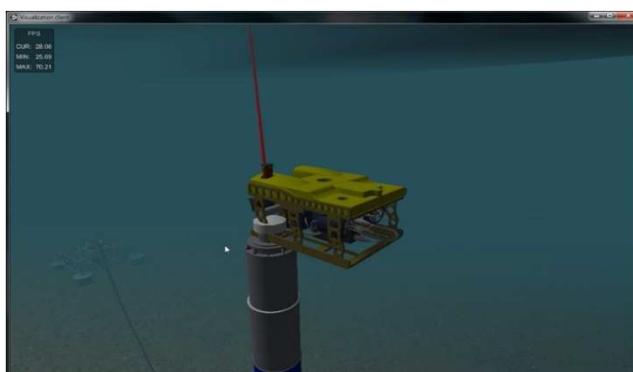


Рис. 6. Операция зацепления буя роботом

Данные о положении каждой трёхмерной модели соответствуют текущему состоянию моделей в федерации. Трёхмерные модели подготавливаются заранее с помощью дополнительного программного обеспечения (catia, 3dsmax, Unity3D).

Для полноты картины предоставлена возможность просмотра лога технологических операций (рис. 7), которые произошли за время имитационного моделирования.

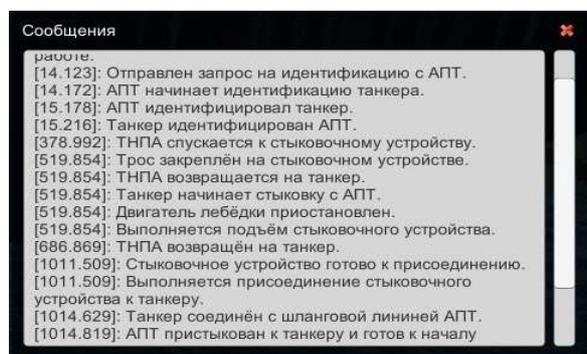


Рис. 7. Вывод технологических операций в программе визуализации

С помощью задания конфигурации сцены в специальном конфигурационном файле программы визуализации можно определить правила генерации ледовой обстановки. Ледовая обстановка существует только в программном комплексе визуализации и не оказывает влияния на моделирование в рамках федерации (рис. 8).

Точный расчёт шланговой линии, соответствующий физическим параметрам заданного шланга, занимает достаточно продолжительное время и не может быть выполнен в режиме реального времени при визуализации. Математическое моделирование и соответствующий расчёт такой шланговой линии выполняются только в критически важные моменты времени, при этом вызывается внешняя программа вычисления и математического моделирования шланговой линии и её физико-параметрических составляющих. Однако во время визуализации отображается правдоподобная шланговая линия, позволяющая корректно оценивать текущее состояние модели (рис. 9).



Рис. 8. Визуализация ледовой обстановки

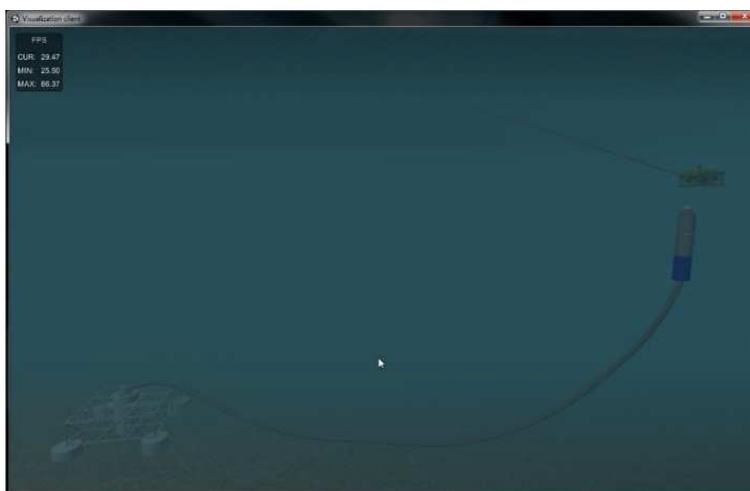


Рис. 9. Построение правдоподобного шланга в визуализации

Для визуализации правдоподобной шланговой линии был разработан уникальный алгоритм расчёта по следующим параметрам:

длина шланга;

диаметр шланга;

положение начала и конца шланга;

набор эмпирических физико-динамических характеристик шланга.

Данные о положении начала и конца шланга соответствуют данным федерации.

Эмпирические физико-динамические характеристики шланга в системе визуализации задаются программистом в специальной секции конфигурационного файла программы визуализации посредством эмпирических коэффициентов. Такой шланг может дать достаточно правдоподобное представление во время симуляции и оказать влияние на принятие решений пользователем по управлению имитационной моделью через федеративное управление и взаимодействия.

Математическое моделирование

В данной работе в рамках рабочей модели шланговой линии принимаются следующие допущения [1]:

поперечные нормальные сечения шланга, плоские до деформации, остаются нормальными и плоскими и после деформации (гипотеза Бернулли);

размеры поперечного сечения считаются малыми по сравнению с длиной шланга и радиусом кривизны оси шланга;

осевая линия шланга считается нерастяжимой;

справедлив принцип Сен-Венана, который утверждает, что различные, но статически эквивалентные, локальные нагрузки вызывают в шланге одно и то же напряженное состояние;

внешние силы, действующие на шланг со стороны жидкости, описываются моделью Морисона [2] без учета силы присоединенной массы жидкой среды.

Также считается, что композитный материал шланга подчиняется закону Гука, и тогда решения задач справедливы, если максимальные нормальные напряжения, возникающие в шланге, остаются меньше предела пропорциональности для данного материала.

С учетом вышеперечисленных допущений уравнение статического равновесия для малого элемента шланговой линии в связанной системе координат запишется в матричном виде [3] так:

$$\mathbf{K} \frac{d\mathbf{Y}}{ds} = \mathbf{F}(s, \mathbf{Y}), \quad (1)$$

где $\mathbf{Y} = [xyz\Omega_1\Omega_2\Omega_3TS_nS_b\theta\phi]^T$ – вектор неизвестных переменных*; s – Лагранжева координата оси шланга; матрица \mathbf{K} содержит в себе массовые и жесткостные характеристики шланга и навесных конструкций; вектор \mathbf{F} – суть совокупности внешних сил, действующих со стороны водной среды и

силы притяжения; $[TS_n S_b]^T$ – вектор натяжения шланга; $[\Omega_1 \Omega_2 \Omega_3]^T$ – вектор Дарбу; θ, ϕ – Эйлеровы углы перехода из глобальной системы координат в локальную [3].

Сложность численного решения системы уравнений (1) заключается в нелинейности действующих на шланг внешних сил, неравномерно распределенной массы вдоль оси шланга (в случае прикрепления на шланг буюв избыточной плавучести), а также в нестандартных граничных условиях в случае шарнирного закрепления двух концов шланговой линии. На основе метода пристрелки и использования адаптивной явно-неявной схемы интегрирования разработан алгоритм численного решения такого рода задач. При этом на каждой новой итерации метода пристрелки численно формируется Якобиан системы (1) в виде LU-разложения. Это требование повышает скорость сходимости алгоритма пристрелки. На каждой итерации метода пристрелки происходит интегрирование системы (1) при помощи явно-неявной схемы.

На рис. 10 представлены результаты расчета трех плоских статических конфигураций шланговой линии с учетом касания дна. Верхний конец шланговой линии закреплен в точке 40 и 90 м по горизонтали и вертикали соответственно в случае (a), 50 и 90 м в случае (b) и 60 и 90 м в случае (c). Остальные параметры шланговой линии приведены в табл. 1.

На рис. 11 приведено сравнение трехмерных конфигураций шланговой линии с равномерно распределенным отрезком избыточной плавучести и одиночным буюем. Верхний конец шланга закреплен в точке 50 и 20 м вдоль осей x и y соответственно, глубина моря 90 м. Остальные параметры шланговой линии, навесных конструкций и линейная интерполяция профиля скоростей от глубины приведены в табл. 1 и 2.

Алгоритм расчета статических конфигураций реализован в программной среде Python 2.7 в виде расчетного модуля, взаимодействующего с федератом визуализации посредством шины взаимодействия.

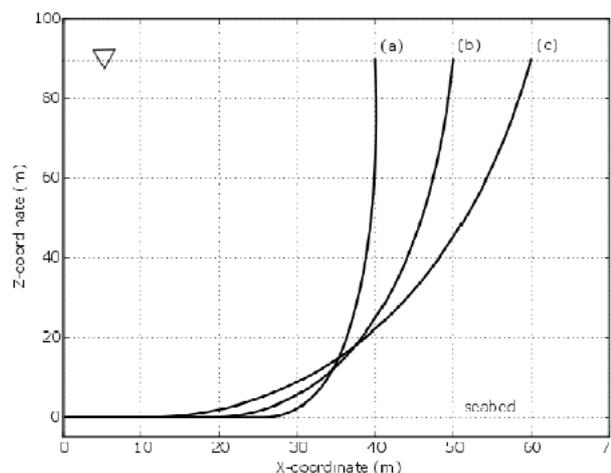


Рис. 10. Двумерные конфигурации шланговой линии с учетом касания дна

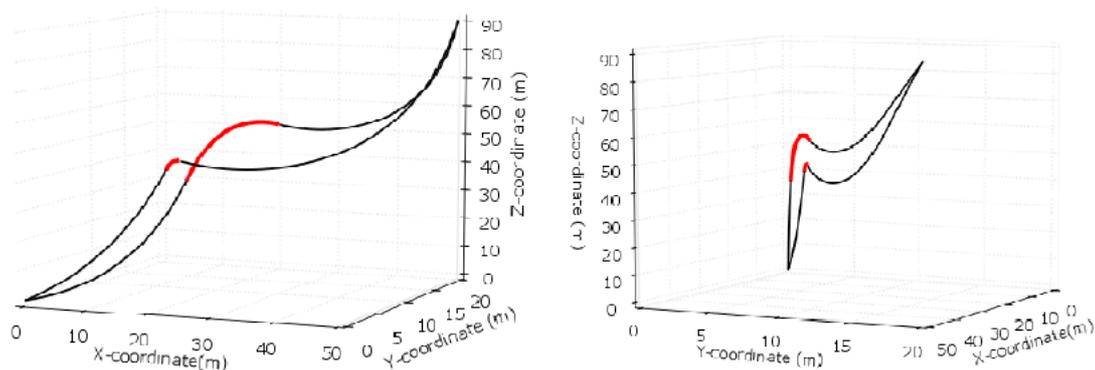


Рис. 11. Трехмерные конфигурации шланговой линии с равномерно распределенным отрезком плавучести, с бумом под разными углами обзора

Таблица 1

Параметры шланговой линии

Длина, м	120
Диаметр, м	0,3
Масса в воде, кг/м	89
Осевая жесткость, Н	$5 \cdot 10^9$
Изгибная жесткость, Н м ²	$6,6 \cdot 10^3$
Торсионная жесткость, Н м ²	$8,5 \cdot 10^4$
Плотность воды, кг/м ³	1025
Гидродинамический коэф. C_{dt}	0,05
Гидродинамический коэф. C_{dn}	1,01

Таблица 2

Параметры навесных конструкций и профиль скоростей

Скорость (вдоль оси x), м/с	0	1	1
Скорость (вдоль оси y), м/с	0	1	2
Высота, м	0	60	90
Конструкция	Избыт. масса в воде, кг/м	Длина/ диаметр, м	Координата крепления, м
Отрезок	222,5	24	48
Буй сферический	2225	3	48

Заключение

В результате опытно-конструкторской работы была создана имитационная модель АПТ танкерного судна и других объектов окружающей среды. Данная система может быть использована для компьютерного моделирования поведения системы в различных ситуациях (входных параметров имитационных моделей). Это позволяет выявлять возможные конструкторские недостатки системы и проводить обучение персонала по использованию имитируемой системы.

Программный комплекс в дальнейшем может быть адаптирован и дополнен более точными моделями отдельных элементов системы АПТ, танкерного судна и влияния окружающей среды.

Список литературы

1. Светлицкий В.А. Механика стержней: учебник для вузов: в 2 ч. Ч. 1. Статика. М.: Высш. шк., 1987. 320 с.
2. J.R. Morison, M.P. O'Brien, J.W. Johnson, S.A. Schaaf. The force exerted by surface waves on piles // Petroleum Transactions. 1950. 189. P. 149–154.
3. Gobat J.I., Grosenbaugh M.A. Time-domain numerical simulation of ocean cable structures [J] // Ocean Engineering. 2006. 33(10). P. 1373–1400.

Палто Виктор Сергеевич, инж.-программист, PaltoVS@yandex.ru, Россия, Москва, АО «Системная динамика»,

Кабанов Сергей Михайлович, гл. инж.-математик, smka-banov@inbox.ru, Россия, Москва, АО «Системная динамика»,

Фридлиндер Григорий Владимирович, инж.-математик, fridlender.g.v@gmail.com, Россия, Москва, АО «Системная динамика»

DEVELOPMENT OF THE INTEGRATED SIMULATION SOFTWARE AND IMITATION MATHEMATICAL MODEL OF THE AUT FOR LOADING AND UNLOADING OF CRUDE OIL BY THE AUT ON TANKER VESSELS WITHOUT DYNAMIC POSITIONING

V.S. Palto, S.M. Kabanov, G.V. Fridlender

This paper presents the computational simulations and applications of tanker vessel positioning, automated underwater terminal (AUT) and other marine environmental objects relative to each other. The article proposes a solution the mooring line profile estimation for loading and unloading crude oil. It presents the visualization and numerical simulations results combining problems and offers its solutions while creation of software and computing system.

Key words: computational simulation, automated underwater terminal, tanker ship, Unity3D, mooring line.

Palto Viktor Sergeevich, software engineer, PaltoVS@yandex.ru, Russia, Moscow, JSC "System dynamics",

Kabanov Sergej Mihajlovich, chief engineer-mathematician, smka-banov@inbox.ru, Russia, Moscow, JSC "System dynamics",

Fridlender Grigorij Vladimirovich, engineer-mathematician, fridlender.g.v@gmail.com, Russia, Moscow, JSC "System dynamics"

УДК 336.74

ПРОИЗВОДСТВО БАНКНОТ

Я.Р. Голубничая, В.А. Селищев

Представлена информация о банкотном производстве, технологии получения банкотной бумаги. Рассмотрены возможности применения полимерных материалов и гибридных субстратов для повышения долговечности банкотной подложки.

Ключевые слова: банкотная бумага, бумагоделательная машина, способы печати, полимерные деньги, гибридные субстраты.

Деньги, в том числе золотые и серебряные монеты, известны с древних времен. Бумажные деньги появились гораздо позже, в Китае, во время правления династии Юань (1271 – 1368 гг.). Известно, что в 1396 г. примеру китайцев последовали вьетнамцы, а в Европе бумажные деньги появились лишь в XVII столетии. Иногда в силу специфических местных условий или чрезвычайных обстоятельств денежные знаки печатались на коже, ткани, дереве, картоне или других материалах, но основой для изготовления банкнот является бумага.

Производство банкнот стало массовым на рубеже XVIII – XIX вв. Сначала бумага отливалась вручную на специальных станках, основной деталью которых были ручные черпальные формы с сетчатым дном. Первую бумагоделательную машину с непрерывным циклом работы («самочерпалку») изобрел механик Л.-Н. Робер в 1798 г. во Франции [1]. Производительность машины была около 100 кг бумаги в сутки, бумажное полотно могло быть длиной до 15 м. В 1800 г. Л.-Н. Робер построил машину, производящую в день 80 листов бумаги, около 6 м каждый лист (рис. 1).

В России производством бумажных денег занимается Гознак – Федеральное государственное унитарное предприятие при Министерстве финансов России. Гознак имеет восемь филиалов – производственные предприятия (Московский и Санкт-Петербургский монетные дворы, Санкт-Петербургская и Краснокамская бумажные фабрики, Московская

и Пермская печатные фабрики, Московская типография) и один научно-исследовательский институт (НИИ Гознака) [2]. Гознак входит в число ведущих мировых поставщиков банкнотной бумаги и банкнот – его заказчиками являются более 20 стран Азии, Африки и Европы, стран СНГ. В 2014 году Гознаком на экспорт было поставлено более 3 400 т банкнотной бумаги и более 1,1 млрд готовых банкнот.

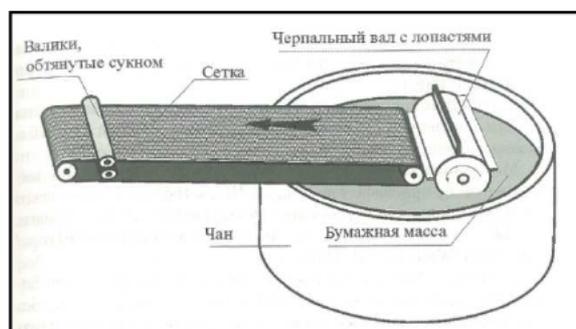


Рис. 1. Вид бумагоделательной машины Л.-Н. Робера

Всего в мире ежегодно производится приблизительно 170 млрд банкнот. Оборот данной отрасли производства приближается к 10 млрд долларов в год. Рост производства составляет в среднем 5 % в год [3].

Изготовлением бумажных денег в мире занимаются несколько сотен предприятий. Непосредственно печать банкнот осуществляют около 60 компаний, большая часть которых (25) находится в Европе, 18 компаний – в Азии и 11 – в Америке. В Африке всего 7 стран имеют свое банкнотное производство. Как правило, все это государственные компании за исключением нескольких, которые получают заказы на изготовление банкнот на открытом рынке [3].

Производителей субстратов (в первую очередь банкнотной бумаги) в мире всего 25, и больше половины их находится в Европе. Только 14 компаний имеют собственное печатное и бумажное производство, т.е. обладают большей частью производственного цикла банкноты [3]. Европейские компании производят 100 000 т защищенной бумаги в год для нескольких мировых валют, потребность Евросистемы в бумаге составляет от 6 000 до 11 000 т в год. Десять производителей аккредитованы Европейским центральным банком с целью производства бумаги для банкнот евро [11].

В отрасли заняты также около сотни поставщиков красок, пленок, голограмм, пигментов, защитных решений или признаков. Еще два десятка компаний проектируют и изготавливают необходимое оборудование для производства банкнот.

Для изготовления банкнот необходимо технологическое разнообразие, использование достижений различных отраслей (химии, оптики, материаловедения, приборостроения и пр.) для защиты от подделок. Производ-

ство бумажных денег можно разбить на несколько этапов: разработка дизайна, отлив специальной бумаги, разработка и изготовление специальных красок, способы нанесения изображений на банкноту, внедрение дополнительных элементов защиты от подделки.

Многосложный производственный цикл изготовления денег начинается с производства банкнотной бумаги. Особые требования к денежной бумаге – износоустойчивость, сопротивление излому и разрыву. Если обычная печатная бумага выдерживает лишь до 20 двойных перегибов, то денежная – до нескольких тысяч!

При отливе банкнотной бумаги в нее внедряются различные защитные признаки – от водяных знаков и волокон, видимых при освещении ультрафиолетовыми лучами, до полимерных вставок, нитей и химических реактивов, обнаруживаемых только специальными детекторами.

Первоначально в составе денежной бумаги использовалась пенька, в наше время вместо нее применяется хлопковое (основной материал) или льняное (в виде добавки) волокно, целлюлоза хвойных пород.

В начале исходный волокнистый материал очищается (удаляются вещества, препятствующих листообразованию), варится и отбеливается. Операция проводится в автоклавах под давлением, при высокой температуре в присутствии химических реагентов. Полученное сырье измельчается в водной среде и перетирается до получения однородной массы (рис. 2). В эту массу добавляются проклеивающие вещества, придающие бумаге механическую прочность и влагостойкость; наполнители, обеспечивающие высокое сцепление краски с бумагой; отбеливатели для придания бумаге белизны и исключения флуоресценции; а также защитные волокна и красители. В качестве клея выступают крахмал, меламиноформальдегидная смола и другие вещества. Прочность зависит также от степени размола волокна – фибрилляции.



Рис. 2. Размол сырья для производства бумаги

Из подготовленной бумажной массы формируется бумажное полотно, которое обезвоживается, прессуется, сушится и пропитывается проклеивающими веществами. Отлив бумаги осуществляется на бумагоделательной машине – круглосеточной или плоскосеточной (рис. 3) [4]. На

круглосеточной (цилиндровой) машине бумажное полотно формируется на цилиндрах, обтянутых сеткой и находящихся в емкости с бумажной массой. В плоскосеточной (столовой) машине изготавливается большая часть обычной бумаги, но для производства банкнотной эта технология была усовершенствована. Это позволило использовать длинные волокна, которые повышают прочность банкнотной подложки и способствуют удлинению срока обращения купюр (по сравнению с банкнотами, изготовленными на основе субстрата из коротких волокон на круглосеточных машинах).

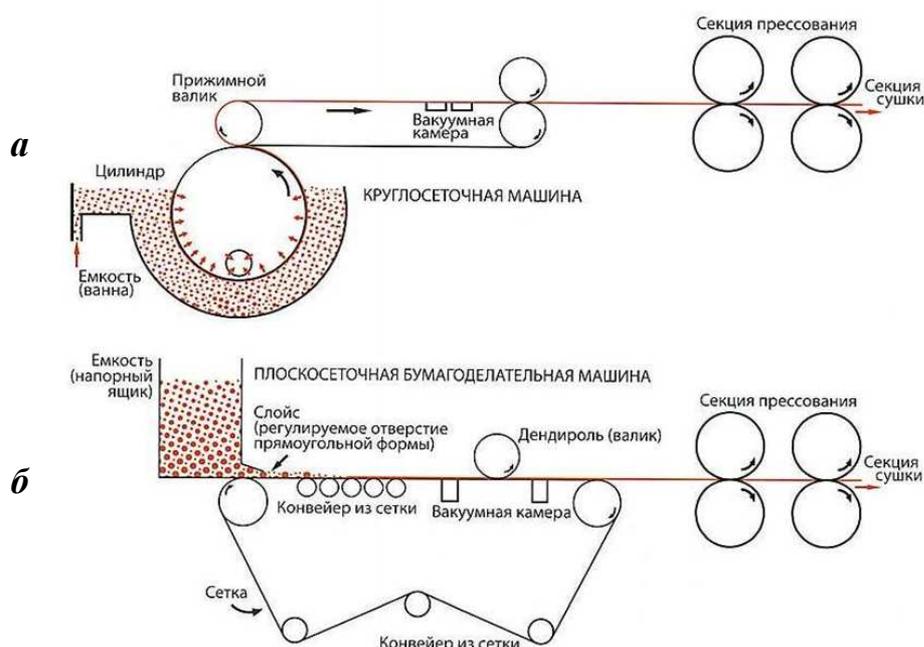


Рис. 3. Схемы формирования бумажного полотна:
а – на круглосеточной машине; **б** – на плоскосеточной машине

Бумага должна иметь большой запас прочности еще и потому, что печать влияет на механическую прочность волокон не лучшим образом. Кроме того, для получения оттисков высокого качества денежная бумага должна иметь определенную степень белизны, непрозрачности и гладкости. Благодаря натуральному составу банкнотная бумага устойчива к воздействию света и долго не «стареет». Полученное бумажное полотно сматывается в рулон, а затем разрезается на листы нужного формата.

Процесс полиграфического производства включает в себя следующие основные этапы:

- фотографический (фотопроцессы, сканирование, цветоделение);
- фотомеханический (изготовление печатной формы);
- получение оттисков с печатных форм (печать);
- отделочный процесс (разрезка, контроль, пересчет, упаковка).

Для печати банкнот используются краски из смеси прочных пигментов и лаков, обладающие повышенной прочностью. Затраты на покупку краски при изготовлении купюр в среднем составляют около 60 % от всех затрат на покупку компонентов и производство банкнот. При печати банкнот также используют специальные флуоресцентные краски, способные светиться в ультрафиолетовом (УФ) излучении. В видимом спектре такие краски могут иметь цвет, но могут быть бесцветными. Используются также краски, обладающие магнитными свойствами (с использованием ферромагнитных добавок), и краски, обнаруживаемые в инфракрасной области спектра. Защитным средством от подделок банкнот служат оптически изменяющиеся (ОВИ – *Optically Variable Ink*) и металлизированные краски (изменяют степень блеска при изменении угла зрения).

При изготовлении бумажных денег используются несколько различных способов печати: офсетный, металлографский (глубокий), типографский (высокий) и трафаретный (шелкография) [4, 5]. В офсетной печати различают плоскую офсетную печать (с увлажнением) и типоофсетную. Разновидностями плоской печати, применяемыми при производстве банкнот, являются орловская печать и ирисовый раскат [5, 6]. Орловская печать была разработана российским изобретателем И.И. Орловым в 1890 году и представляет собой многокрасочную однопрогонную печать, позволяющую достигать на изображении точного совмещения красок разных цветов в неразрывных линиях. Граница перехода является четкой, современное оборудование позволяет получить многокрасочные штриховые изображения с резкими красочными границами без разрывов, смещений и наложений.

При ирисовом раскате в элементах получаемых изображений присутствует плавный переход одного цвета в другой, четкая граница перехода отсутствует.

Офсетным способом печатается фоновое изображение банкнот – на бумагу одновременно с двух сторон наносится точно совпадающие на просвет офсетные рисунки. Краска высыхает двое – трое суток, после чего в цехе металлографской печати на листы наносится трехмерный рисунок – на оборотную сторону купюр, а через несколько дней – на лицевую. Металлографская печать – самый высокозащищенный способ печати, который позволяет получать широкий спектр визуальных защитных признаков [7]. Затем с помощью уникального лазерного оборудования в купюрах прошиваются мельчайшие отверстия (микроперфорация), которые образуют на бумаге цифру, соответствующую номиналу банкноты. Банкноты проходят через цех трафаретной печати для нанесения защитных элементов с применением оптически переменных красок (иридисцентных, ОВИ). Трафаретная печать осуществляется при помощи трафарета (как правило, натянутой на рамку мелкоячеистой шелковой или полимерной сетки). Способом высокой печати печатаются серийные номера банкнот.

Контроль на всех участках производства непрерывный – его постоянно осуществляют машины и люди. В заключение банкнотные листы перевозят на резку, сортировку и упаковку. Полный производственный цикл изготовления банкноты занимает приблизительно месяц.

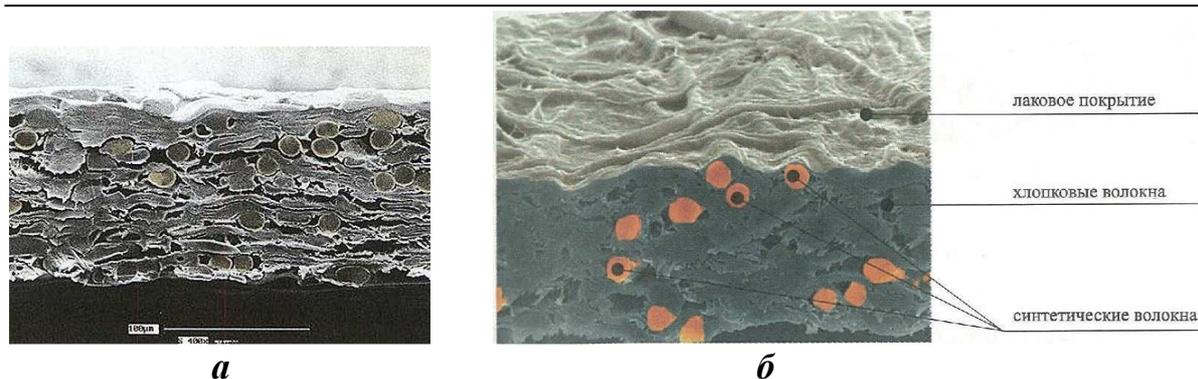
Стоимость организации обращения банкнот зависит от срока их «жизни» – только затраты на уничтожение бумажных денег достигают 20 % всех расходов по их выпуску. Традиционные бумажные деньги быстро изнашиваются, а также загрязняются – особенно остро эта проблема стоит в странах с влажным климатом и неблагоприятной инфекционной обстановкой. Производители постоянно работают над тем, чтобы сделать банкноты более долговечными и безопасными. Например, французская компания Arjowiggins Security разработала антибактериальный банкнотный субстрат *Bioguard*[®], который останавливает развитие вредных микроорганизмов на купюрах и даже уничтожает их.

Помимо бумаги из хлопкового волокна, субстратами для печати банкнот также могут быть долговечная бумага, полимер (пластиковый субстрат) или гибридный субстрат (комбинация бумажного и полимерного субстрата).

В качестве защиты бумаги от факторов внешней среды используются различные покрытия – чаще всего разновидности прозрачного лака, наносимого тонким слоем непосредственно на бумажный субстрат или готовый отпечатанный продукт. Банкнотная бумага с таким защитным покрытием стала выпускаться с конца 1990-х годов и получила название Durable Banknote Paper (долговечная банкнотная бумага), так как использование такого покрытия увеличивает время обращения купюр. Такая бумага представлена на рынке под несколькими марками: *LongLife*[®] (Louisenthal, Германия), *Platinum*[®] (Portals, Великобритания), *Marathon Coated*[®] (Crane, США) [1].

Компания Crane Currency разработала технологию изготовления бумаги повышенной прочности *Endurance*[®], которая включает в себя 4 компонента: прочные волокна, из которых готовится бумага, грязеотталкивающая обработка, которая пропитывает как саму бумагу, так и внешние покрытия, металлографская печать, которая связывает красочный слой с бумажными волокнами, и лаковое покрытие, которое связывает все внешние слои с бумажным слоем.

Компания Papierfabrik Louisenthal (подразделение Giesecke & Devrient) выпускает бумагу *Synthec*[®], состоящую из 80 % хлопковых и 20 % синтетических волокон. Синтетические волокна и защитный слой *LongLife*[®] обеспечивают оптимальную комбинацию прочности, жесткости и устойчивости к загрязнению (рис. 4, а). Компания Arjowiggins Security разработала банкнотную бумагу *Diamone*[®], срок жизни которой, полагают в компании, в 3 раза длиннее обычной (рис. 4, б) [1].



**Рис. 4. Вид среза композитной бумаги под микроскопом:
а – Synthec®; б – Diamone® Composite**

Бумагу для долларов США отливают с применением длинных волокон, а в качестве дополнительного упрочнения наряду с натуральными волокнами используются и синтетические (до Первой мировой войны использовались шелковые нити).

Кардинальным решением проблемы долговечности банкнотной подложки является применение полимерных материалов – их преимущества по сравнению с бумагой состоят в большей механической прочности и устойчивости к воздействиям внешней среды (температуре, влажности, различным химическим агентам и т.п.). По сравнению с бумагой пластик лучше сцепляется с различными ламинатами, на нем можно использовать некоторые дополнительные технологии защиты, которые невозможны на бумажной основе. Полимерная подложка банкнот – это прозрачная пленка толщиной около 0,1 мм, покрытая с обеих сторон белой краской.

Первые полимерные банкноты были напечатаны компанией American Banknote Company на полимерном материале *Tyvek*®, разработанном американской компанией DuPont в 1982-1983 гг. для Коста-Рики, Гаити и острова Мэн. Субстрат *Tyvek*® фактически копировал волокнистую структуру бумаги. Тестовые выпуски полимерных банкнот были сделаны для Венесуэлы, Гондураса, Эквадора и Эль-Сальвадора. Однако банкноты не выдержали испытаний тропического климата: краска отслаивалась от субстрата, банкноты приобретали неприятный запах.

В 1988 году в Австралии были выпущены в обращение полимерные банкноты на новом многослойном субстрате *Guardian*® от австралийской компании Securency (Innovia Security). Технология *Guardian*® применяет полимер двуосной ориентации (biaxially-oriented polypropylene, BOPP), для чего из полипропиленовой трубки выдуваются пузыри с малой толщиной пленки (рис. 5) [8]. Сегодня большинство полимерных банкнот в мире выпускается на субстрате *Guardian*®.

В 2013 году британская компания De La Rue запустила полимерную основу *Safeguard*®, на которой с тех пор произведено более 60 миллионов полимерных банкнот.

Весь банкнотный ряд представлен банкнотами на полимерной основе в Австралии, Брунее, Вануату, Вьетнаме, Канаде, Новой Зеландии, Папуа-Новой Гвинее, Румынии, на Мальдивах. В некоторых государствах часть банкнотного ряда представлена пластиковыми банкнотами (Бангладеш, Гватемала, Гондурас, Гонконг, Доминиканская Республика, Израиль, Индонезия, Кабо-Верде Коста-Рика, Маврикий, Мавритания, Малайзия, Мексика, Мозамбик, Остров Мэн, Нигерия, Никарагуа, Парагвай, Сингапур, Тайланд, Тринидад и Тобаго, Фиджи, Чили). Из пластика выпускались только памятные банкноты в Бразилии, Гамбии, Гибралтаре, Китае, Ливане, Непале, Польше, Самоа, Северной Ирландии, Тайване, Шотландии, Шри-Ланке и на Соломоновых островах [9].

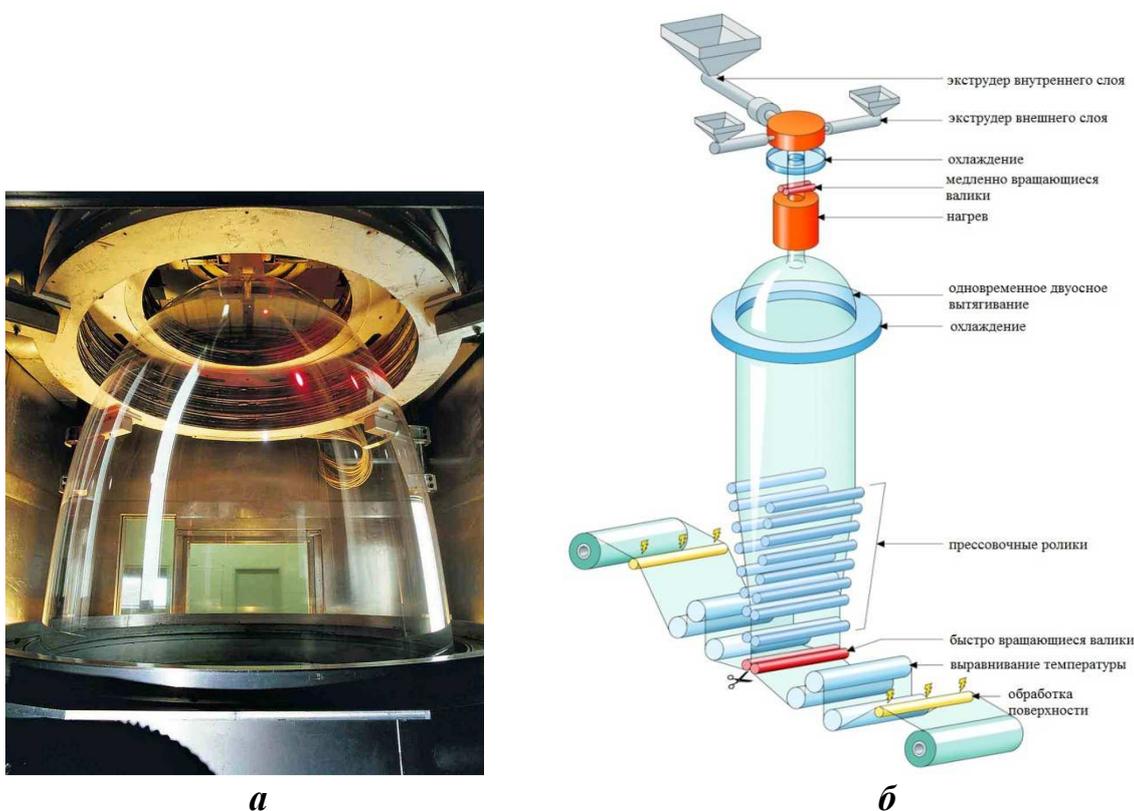


Рис. 5. Создание ВОРР:

а – начальная стадия формирования пузыря; б – схема процесса

Попытка соединить достоинства бумаги и пластика в одном материале привела к созданию гибридных субстратов – комбинации бумажного и полимерного субстрата. У этого типа есть слоистая структура, объединяющая слои различных материалов.

В 2008 году компания Louisenenthal представила гибридный субстрат *Hybrid*[®], который представляет собой бумажный лист, покрытый с обеих сторон тонкой пленкой (толщиной около 6 мкм) полиэстера (рис. 6) [1]. Данный субстрат прочнее бумаги, но позволяет применять все защитные

технологические приемы, используемые при производстве банкнот на бумажной основе, а также обладает высокой устойчивостью к загрязнению (превосходит наиболее распространенные сорта банкнотной бумаги в 10 раз).

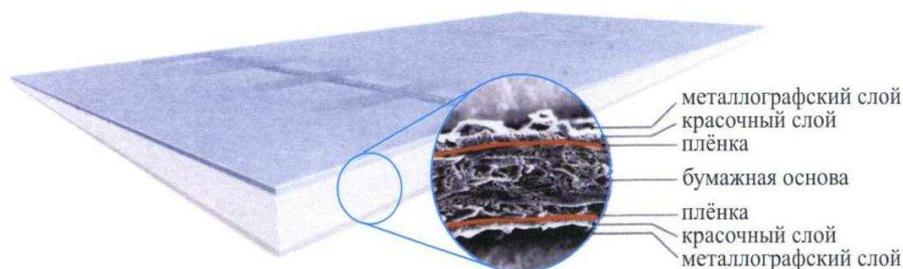


Рис. 6. Структура субстрата Hybrid®

Итальянская компания *Fabiano* разработала композитный трехслойный материал *Fusion*®. Как и *Hybrid*®, *Fusion*®, представляющий собой многослойный субстрат, основу которого составляет бумажный слой, расположенный между двумя слоями полимера. На поверхность полимерного материала до начала процесса печати наносится специальное покрытие.

Швейцарская фирма *Landqart* применила другое сочетание полимера и бумаги – полимерная пленка толщиной 40 мкм помещена между двумя листами бумаги и прессуется под давлением, без применения клеящих веществ. Использование полимерной пленки позволило существенно увеличить механическую прочность этого гибридного субстрата. Кроме того, технология *Durasafe*® позволяет использовать защитные признаки, которые невозможно реализовать ни на бумажном, ни на полимерном субстрате. В 2015 году компания представила новый субстрат *Durafort*®, сочетающий 100 %-ную хлопковую бумагу с долговечной полимерной основой.

В некоторых странах гибридными банкнотами представлен весь банкнотный ряд (Бермудские острова) или его часть (Гибралтар, еврозона, Ирак, Исландия, Казахстан, Катар, Монголия, Оман, Объединенные Арабские Эмираты, Самоа, Свазиленд, Соломоновы острова, Таджикистан, Тонга, Фиджи, Ямайка), в некоторых на гибридном субстрате выпускались только памятные банкноты (Болгария, Марокко, Папуа-Новая Гвинея, Россия) [10].

Крупнейшие европейские производители банкнотных субстратов приведены в таблице.

Для локального увеличения механической прочности наиболее уязвимых участков банкнот (угловых и боковых кромок) делаются попытки использовать водяной знак. Компания *Portals* (бумагоделательное подразделение *De La Rue*) запатентовала технологию *Cornerstone*® – нанесение водяных знаков в виде нескольких параллельных линий в углах банкнот,

которые наиболее подвержены износу в процессе обращения. Для увеличения прочности боковых кромок применяется *Edgetone*[®] – нанесение нескольких линий водяных знаков вдоль длинных сторон банкноты [1].

Таким образом, проблему быстрого износа банкнот производители защищенной бумаги пытаются решать различными способами. Поскольку стоимость банкноты на 65...80 % зависит от цены субстрата и используемых защитных решений, основными тенденциями в производстве банкнот являются усиление их защиты и повышение долговечности за счет усовершенствования субстрата. Все шире в банкнотном производстве применяются гибридные субстраты, используются полимеры.

Крупнейшие производители банкнотных субстратов в Европе

Субстрат / валюта	Производители					
	Louisenthal	Crane	Fedrigoni	Гознак	Landqart	De la Rue
Стандартная бумага	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Долговечная бумага	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Гибридный субстрат	Да	-	Да	Да	Да	-
Полимер	-	-	-	-	-	Да
Евро	Да	Да	Да	-	Да	Да
Другая	-	Более 30	25	15	Более 30	Более 80

Хотя пластиковые деньги превосходят бумажные в стойкости к повреждениям и сроке службы, они значительно дороже в производстве, требуют специальных печатных технологий, а также быстрее выводят из строя счетно-сортировальное оборудование. Многие специалисты считают, что применение бумажной подложки является менее дорогим и не менее эффективным путем защиты банкнот, позволяет использовать большее количество защитных признаков [6].

Центральные банки многих стран серьезно взвешивают все «плюсы» и «минусы» в отношении применения пластиковых банкнот. В некоторых случаях после использования пластиковых денег происходит возврат к бумажным банкнотам. Ведущие мировые державы продолжают использовать бумажные деньги, но изготовленные с помощью материалов и технологий, значительно изменяющих свойства бумаги.

Список литературы

1. Маресин В.М. Защищенная полиграфия: справочник. М.: Флинта; МГУП им. И. Федорова, 2012. 640 с.

2. Гознак // Википедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения 26.02.2016).

3. Трачук А.В., Корнилов Г.В. Динамика процессов внедрения инноваций в области производства банкнот // Деньги и кредит. 2013. № 9. С. 3-9.

4. Банкнотная индустрия: современные технологии и рекомендации: справочное пособие / Международная валютная ассоциация (International Association Of Currency Affairs – IACA). М.: ИнтерКрим-пресс, 2011. 80 с.

5. Авдошин В.В. Определение подлинности и платежеспособности денежных знаков: методическое пособие / отв. редактор И. М. Жилкин. М.: ИнтерКрим-пресс, 220. 104 с.

6. Ионов В.М. Внимание, деньги! PRO Intellect Technology, 2008. 60 с.

7. Головачев В. Так делают деньги // Труд. 2006. 7 апреля.

8. Субстрат Guardian // Innovia Security [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: www.innoviasecurity.com/guardian-facts-and-figures (дата обращения 07.03.2016).

9. Полимерные деньги // Википедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Полимерные_деньги (дата обращения 06.03.2016).

10. Гибридные банкноты // Википедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Гибридные_банкноты (дата обращения 07.03.2016).

11. Производители банкнотного субстрата в Европе // ГОЗНАК [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://goznak.ru/about/press/press/9876> (дата обращения 07.03.2016).

Голубничая Яна Романовна, студентка, yana_tula@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Селищев Валерий Анатольевич, канд. техн. наук, доц., sel648val@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MANUFACTURING OF BANKNOTES

Y.R. Golubnichaya, V.A. Selishchev

The article provides information on banknote and banknote paper manufacturing. The possibilities of polymer and hybrid substrates application for purpose of improving banknote durability are considered.

Key words: banknote paper, paper machine, printing methods, durable banknote paper, polymer banknotes (notes), hybrid substrates.

Golubnichaya Yana Romanovna, student, yana_tula@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Selishchev Valery Anatolievich, candidate of technical sciences, docent, sel648val@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

РЕАЛИЗАЦИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ «МИКРОРЕЛЬЕФ – ХОДОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ» С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ ВИБРОЗАЩИТЫ

И.И. Малахов, М.В. Суковин

Рассматривается проблема воздействия производственной вибрации на организм человека-оператора строительно-дорожной машины. Для моделирования при проектировании виброизоляторов на различных видах машин разработана математическая модель взаимодействия «микрорельеф – элементы ходового оборудования», реализованная в программном комплексе MATLAB.

Ключевые слова: виброзащита, строительно-дорожная машина, ходовое оборудование, микрорельеф, математическая модель.

Одним из основных источников воздействия вибрации на кабину строительно-дорожной машины является взаимодействие ходового оборудования машины с микрорельефом [1]. При проектировании виброизоляторов кабины, кресла человека-оператора необходимо проведение машинного эксперимента с целью определения эффективности применяемого устройства виброзащиты. Для отражения влияния микрорельефа на строительно-дорожную машину используются его математические модели, которые могут быть представлены детерминированными и стохастическо-детерминированными функциями, а также записью реального случайного профиля.

Детерминированные модели представляют собой математическое описание неровностей рельефа в виде детерминированных функциональных зависимостей вертикальных координат поверхности от горизонтальных координат. Они менее достоверны по сравнению со стохастическими и имеют ограниченные возможности. Их в основном используют при подтверждении адекватности создаваемых математических моделей, анализе частотных характеристик исследуемых машин и качественных показателей систем управления рабочим органом [2].

Реальный случайный профиль представляет собой замеренные с определенным шагом вертикальные координаты поверхности относительно принятой системы координат. Он имеет ограниченное применение и используется в основном при создании наземных транспортных средств.

Для изучения строительно-дорожной машины наиболее удобно пользоваться стохастическо-детерминированной моделью земляного полотна. При этом корреляционная функция профиля задается детерминированной моделью, а по ней с использованием рекуррентных соотношений строится на ЭВМ псевдослучайный профиль.

Профиль местности делится на три составляющие – макропрофиль, микропрофиль и шероховатости. Макропрофиль состоит из длинных плавных неровностей (длина волны от 100 м и более) и практически не вызывает колебаний машины. Микропрофиль состоит из неровностей (длина волны от 10 см до 100 м) и вызывает заметные колебания машины. Шероховатости (длина волны менее 10 см) сглаживаются шинами и не вызывают ощутимых колебаний машины [2,6].

В настоящее время накоплен обширный материал, описывающий статистические свойства различных типов грунтовых поверхностей. Математическому описанию микрорельефа посвящено много работ как в нашей стране, так и за рубежом [3].

Микропрофиль является случайной функцией протяженности пройденного пути ℓ , и его принято рассматривать как случайную функцию, удовлетворяющую следующим допущениям: функция стационарна; ординаты микропрофиля подчиняются нормальному закону распределения; длины неровностей ограничены по верхнему и нижнему пределам; микропрофиль меняется случайным образом только в вертикальной продольной плоскости [7].

Для использования статических характеристик грунта в качестве возмущающего воздействия их целесообразно выражать в функции времени t . При этом необходимо знать скорость движения V и использовать соотношение

$$t = \frac{\ell}{V}, \quad (1)$$

где ℓ – длина пройденного пути.

Достаточными статистическими характеристиками микропрофиля дороги являются его корреляционная функция $R(\ell)$ и спектральная плотность $S(\omega)$.

Корреляционная функция дает представление об изменении микропрофиля по длине участка (или случайного колебательного процесса во времени), другая характеристика (спектральная плотность дисперсий) дает представление о частоте повторения длин неровностей (о преобладающих частотах или случайном процессе). Аргументом спектральной плотности является так называемая частота дороги ("путевая частота")

$$\omega = 2 \cdot \frac{\pi}{\ell}. \quad (2)$$

Для аналитической поверхности, представленной в виде

$$y = y(x, z), \quad (3)$$

где x, z – продольная и поперечная координаты точки поверхности с вертикальной координатой y , двумерная корреляционная функция имеет вид

$$R(\xi, \eta) = \lim_{\substack{x \rightarrow \infty \\ z \rightarrow \infty}} \frac{1}{4 \cdot x \cdot z} \int_{-x}^x \int_{-z}^z y(x, z) y(x + \xi, z + \eta) dx dz. \quad (4)$$

Вычисление двумерной корреляционной функции $R(\xi, \eta)$ сложно и трудоемко. В работах предложено описывать микрорельеф поверхности двумя функциями микропрофиля по левой и правой колее, а поперечный уклон в поперечном сечении оценивать по вертикальным координатам левой и правой колеи [8].

Зная корреляционную функцию микропрофиля, можно определить спектральную плотность дисперсий $S(\omega)$. Они связаны между собой преобразованием Фурье:

$$R(\ell) = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) \cos(\omega \ell) d\omega, \quad (5)$$

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} R(\ell) \cos(\omega \ell) d\ell. \quad (6)$$

Большинство грунтовых поверхностей имеет корреляционные функции, которые описываются выражениями

$$R(\tau) = \sigma_k^2 \cdot e^{-\alpha_k |\tau|}, \quad (7)$$

$$R(\tau) = \sigma_k^2 \cdot e^{-\alpha_k |\tau|} \cos(\beta_k \tau), \quad (8)$$

где α_k, β_k – коэффициенты, зависящие от типа профиля; $\tau = \ell \cdot V$, где V – скорость движения; ℓ – расстояние, пройденное от начала отсчета; σ_k^2 – дисперсия статистики микропрофиля поверхности.

Для моделирования на электронно-вычислительной машине случайного процесса используются рекуррентные уравнения вида.

Для корреляционной функции (7)

$$y(n) = a_0 \cdot x(n) + b_1 \cdot y(n-1), \quad (9)$$

где $a_0 = \sigma \cdot \sqrt{1 - \rho^2}$, $b_1 = \rho$, $\rho = e^{-\gamma}$, $\gamma = \alpha \cdot h$.

Для корреляционной функции (8)

$$y(n) = a_0 \cdot x(n) + a_1 \cdot x(n-1) + b_1 \cdot y(n-1) + b_2 \cdot y(n-2), \quad (10)$$

где

$$a_0 = \sigma \cdot C, \quad a_1 = \frac{\sigma \cdot C_0}{C}, \quad b_1 = 2 \cdot \rho \cdot \cos \gamma_0, \quad b_2 = -\rho^2, \quad C_0 = \rho \cdot (\rho^2 - 1) \cdot \cos \gamma_0,$$

$$C_1 = 1 - \rho^4, \quad \rho = e^{-\gamma}, \quad \gamma = \alpha \cdot h, \quad C = \frac{\sqrt{C_1 \pm \sqrt{C_1^2 - 4 \cdot C_0^2}}}{2},$$

$$\gamma_0 = \beta \cdot h,$$

где σ – среднеквадратическое отклонение исходного профиля; α, β – коэффициенты затухания и периодичности корреляционной функции; h – шаг дискретности времени.

Для моделирования микрорельефа используется стохастическо-детерминированная модель [4].

На основании уравнений (9), (10) в программном комплексе *MATLAB* разработана подсистема, алгоритм работы которой представлен на рис. 1. Диалоговое окно программы представлено на рис. 2.

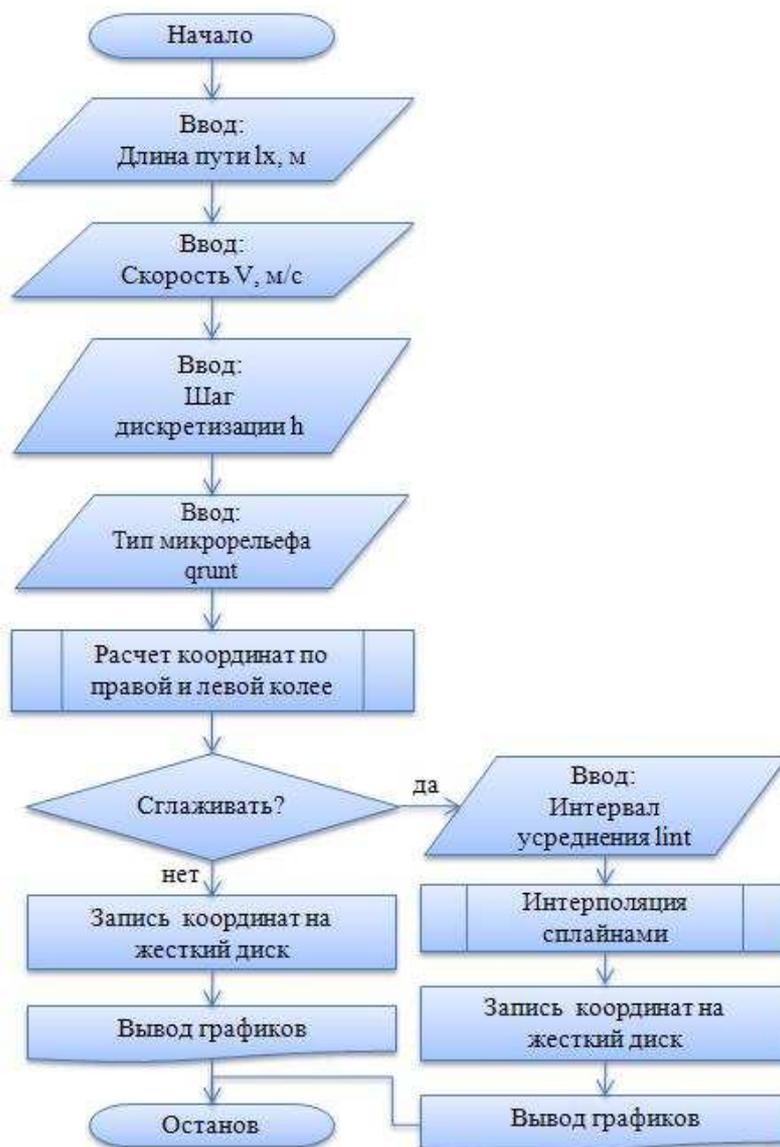


Рис. 1. Блок-схем подсистемы, моделирующей микрорельеф

В подсистеме заданы корреляционные функции четырех типов микрорельефа: № 1 – асфальтовое покрытие хорошего качества, № 2 – цементно-бетонное покрытие, № 3 – булыжное покрытие с впадинами и буграми, № 4 – булыжник удовлетворительного качества.

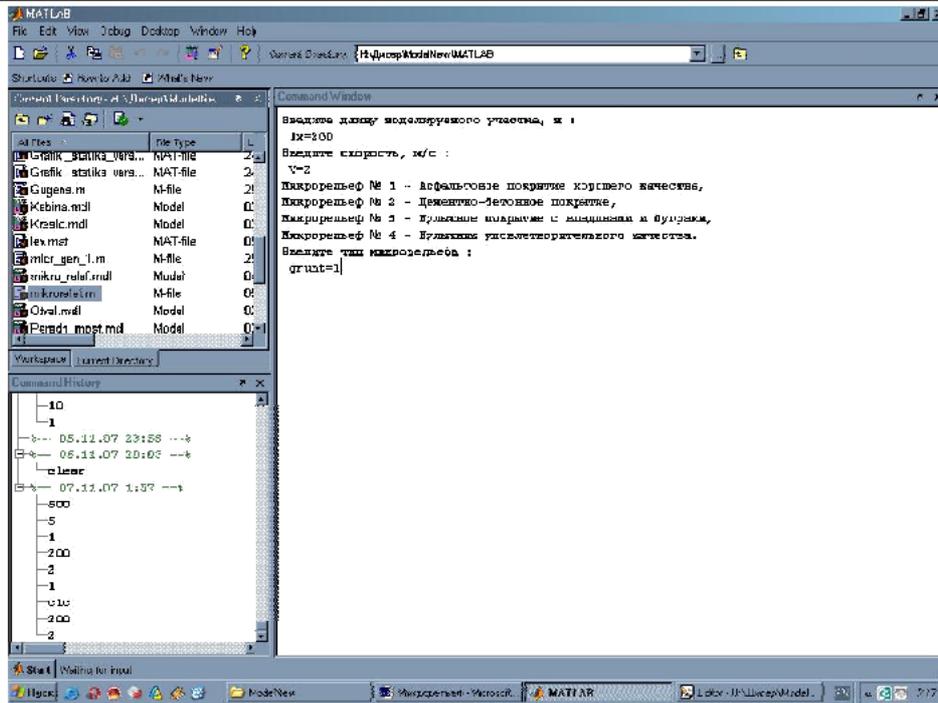


Рис. 2. Диалоговое окно файл-функции mikrorelief

В результате работы подсистемы получаем кинематическое возбуждение, т.е. вертикальную координату микро рельефа. Для передачи возбуждения в имитационную модель необходимо кинематическое возбуждение перевести в силовое. Для этой цели в пакете расширения Simulink программного комплекса MATLAB разработана подсистема, показанная на рис. 3. [9].

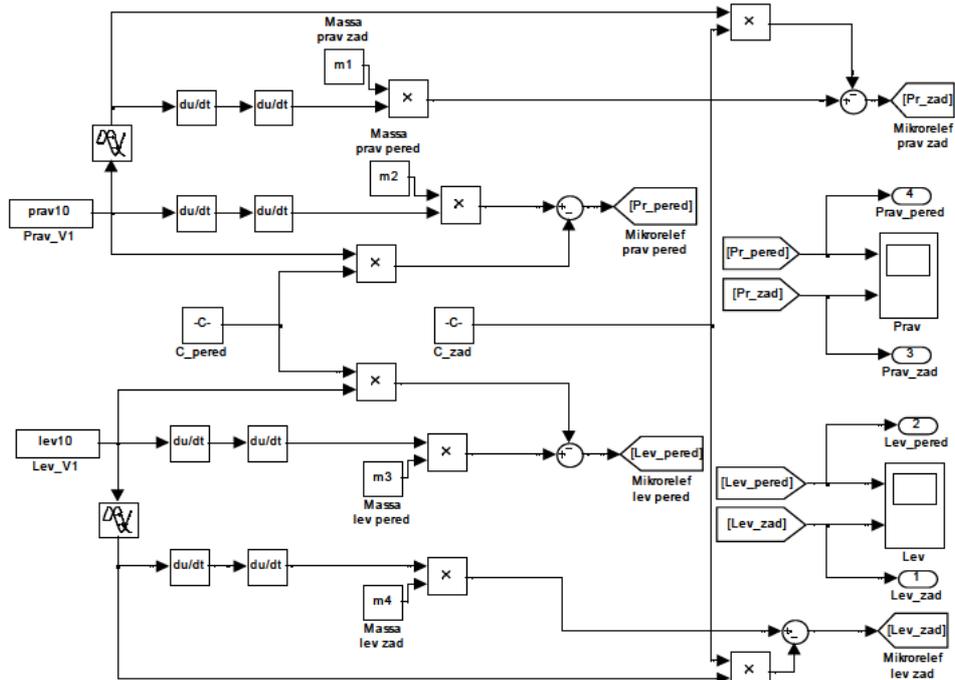


Рис. 3. Подсистема пересчета кинематического возбуждения в силовое

Алгоритм, поясняющий работу подсистемы изображенной на рис. 3, представлен на рис. 4.

На рис. 5 показан результат выполнения файл-функции при $l_x = 100$ м, $V = 2$ м/с, $grunt = 1$ (асфальтовое покрытие хорошего качества). Также результаты сохраняются в рабочей области и на жестком диске в текущем каталоге [10].



Рис. 4. Блок-схема алгоритма работы подсистемы пересчета кинематического возбуждения в силовое

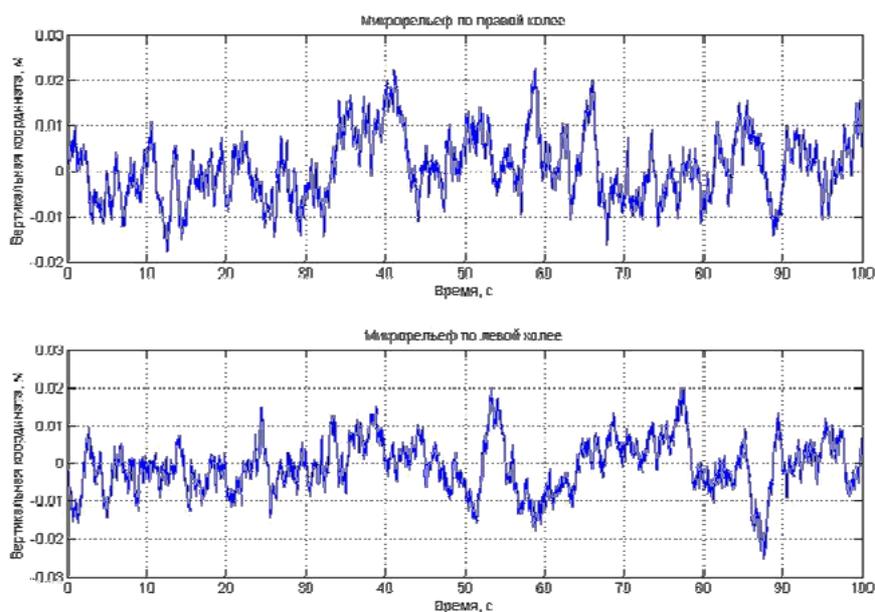


Рис.5. Результат выполнения файл-функции mikrorelief

Полученная математическая модель "микрорельеф – элементы ходового оборудования строительно-дорожной машины" и реализованная в программном комплексе *MATLAB* позволяет рассчитывать силы, действующие на элементы ходового оборудования, в зависимости от скорости и типа микрорельефа, по которому движется строительно-дорожная машина. Данная программа является полезной при определении вибрационной нагрузки на человека-оператора на этапе проектирования различного типа и назначения строительно-дорожных машин.

Список литературы

1. Малахов И.И. Система автоматизированного моделирования сложной динамической системы «микрорельеф – базовая машина – кабина – человек-оператор» // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2008. № 10. С. 80 – 85.

2. Щербаков В.С., Малахов И.И. Система моделирования устройств виброзащиты кабины строительно-дорожной машины // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 9. С. 6 – 11.

3. Алешков Д.С., Суковин М.В. К вопросу оптимизации профессиональных рисков в перевозочном процессе // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! 2011. № 2. С. 297 – 300.

4. Суковин М.В., Алешков Д.С. Закономерности воздействия производственной вибрации на организм человека-оператора транспортного средства при перевозках грузов // Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации: материалы Международного конгресса / ФГБОУ ВПО «СибАДИ». Омск, 2013. С. 22-25.

5. Алешков Д.С., Столяров В.В., Суковин М.В. Методы снижения вредного воздействия производственной вибрации на организм человека-оператора строительно-дорожных машин // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». Т. 7. N5 (2015) [Электронный ресурс] URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/218TVN515.pdf> (дата обращения: 16.02.2016).

6. Силаев А.А. Спектральная теория подрессоривания транспортных машин. М.: Машиностроение, 1972. 192 с.

7. Вибрация в технике: справочник в 6 / под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 1981. 456 с.

8. Маслов Г.С., Артемьев В.С., Макаров В.А. Колебания в машинах и элементы виброзащиты: учеб. пособие. М., 1987. 92 с.

9. Алешков Д.С., Столяров В.В., Суковин М.В. Снижение эквивалентного уровня вибрации методом совершенствования конструкций элементов виброзащиты строительно-дорожных машин // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». Т. 7. N5 (2015) [Электронный ресурс] URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/198TVN515.pdf>. (дата обращения: 16.02.2016).

10. Малахов И.И. Система автоматизации проектирования устройств виброзащиты кабин дорожных машин на базе колесных тракторов диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: / дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2009.

Малахов Иван Игоревич, канд. техн. наук, доц., mivan.doc@yandex.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Суковин Михаил Владимирович, канд. техн. наук, доц., sukovin_8@mail.ru, Россия, Омск, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия

**THE IMPLEMENTATION IN SOFTWARE OF A MATHEMATICAL MODEL
"THE MICRORELIEF OF – WAY EQUIPMENT" THE PURPOSE OF CREATION OF
VIBROPROTECTION**

I.I. Malakhov, M.V. Sukovin.

The problem of impact of production of vibration on the human operator of construction machinery is considered. For modeling in the design of vibration isolators for various types of machinery the mathematical model of interaction "micro - elements navigation equipment" implemented in the software package MATLAB.

Key words: vibroprotection, road-building machine chassis equipment, relief, mathematical model.

Malakhov Ivan Igorevich, candidate of technical sciences, docent, mivan.doc@yandex.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Sukovin Mikhail Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, sukovin_8@mail.ru, Russia, Omsk, Siberian State Automobile and Highway Academy

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.914.5.002.54

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ПРОФИЛЯ ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ С ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ СМП

О.И. Борискин, Н.Г. Стаханов, С.Я. Хлудов,
А.В. Якушенко, И.В. Горынина

На основе разработанных теоретически точных зависимостей приведены результаты анализа степеней влияния их основных параметров на отклонения профиля фрез от теоретически требуемых и рекомендации по их минимизации.

Ключевые слова: червячные фрезы, твердосплавные СМП, профиль, оптимизация, отклонения.

В технологическом процессе изготовления зубчатых колес нарезание зубьев является самым трудоемким процессом. На его долю приходится примерно 50...60 % от общей трудоемкости обработки колеса.

Как правило, при отсутствии каких-либо ограничений зубонарезание производят червячными фрезами, которые позволяют обеспечить высокую производительность и точность. Поэтому совершенствованию червячных фрез в настоящее время уделяется особое внимание. В частности, появились конструкции червячных фрез со сменными многогранными пластинами твердого сплава (СМП), позволяющие вести обработку на более высоких скоростях резания, обрабатывать труднообрабатываемые материалы, термически обработанные заготовки. Но при этом возник ряд проблем, прежде всего связанный с точностью таких фрез. Эти проблемы условно можно разделить на 3 группы:

1-я группа связана с решением теоретических вопросов формирования поверхностей червячных фрез и их режущих кромок;

2-я группа – с конструктивным решением;

3 группа вопросов включает приемы и способы изготовления, контроля и эксплуатации.

Ниже приведены результаты теоретических исследований точности профилирования эвольвентных червячных фрез в зависимости от метода их расчета.

Важнейшим свойством эвольвентного зацепления является то, что зубья колеса с эвольвентным профилем могут правильно зацепляться только с зубьями колеса, имеющего эвольвентный профиль, или с зубьями рейки с прямолинейным профилем. В данном случае под правильностью зацепления понимается, что при равномерном движении ведущего звена (вращательном для колеса или прямолинейном для рейки) ведомое звено будет также равномерно двигаться (вращаться колесо или двигаться поступательно рейка).

В отличие от других видов зацеплений правильность эвольвентного зацепления не нарушается при изменении расстояния между звеньями.

Поверхности зуба обрабатываемого колеса и производящая поверхность основного червяка фрезы имеют точечный контакт.

В процессе согласованных вращательных движений точка контакта на поверхности обрабатываемого зуба опишет контактную линию. В результате движения подачи такая линия смещается вдоль зуба колеса. Обработанная поверхность зуба колеса представляет собой геометрическое место всех этих линий контакта.

Таким образом, обработанная поверхность зуба колеса будет представлять собой геометрическое место всех линий контакта, образующихся в результате наличия продольной подачи.

На производящей поверхности фрезы точка контакта также образует контактную линию, которую следует рассматривать как теоретическую, не имеющую материального воплощения.

Материальными будут только точки на режущих кромках, они же профилирующие. Эти точки являются точками пересечения режущих кромок фрезы с вышеуказанной линией контакта. Вследствие такого явления профиль обработанного зуба детали получит огранку. Размеры огранки зависят от числа зубьев червячной фрезы, формирующих профиль детали. Чем больше зубьев участвует в процессе формирования профиля детали, тем меньше высота гребешков огранки по высоте обрабатываемого зуба.

В результате смещения режущих кромок фрезы, обусловленного движением продольной подачи, образуются гребешки вдоль обрабатываемого зуба. Их высота в первую очередь зависит от принятой продольной подачи и диаметра червячной фрезы.

Для уменьшения высоты гребешков возможно применять диагональные подачи, в результате которых будут смещаться профилирующие точки режущих кромок. Это приведет к более равномерной их загрузке и повышению стойкости фрезы.

Однако для реализации такой подачи необходимы соответствующие возможности зубофрезерного станка с соответствующей его настройкой, червячная фреза должна иметь увеличенную длину, следовательно, большее число зубьев участвует в работе. В результате будет увеличиваться накопленная погрешность осевого шага.

Согласно принципу Оливье между двумя сопряженными поверхностями может располагаться третья поверхность, имеющая с ними общий контакт. Применительно к эвольвентной винтовой паре со скрещивающимися осями «колесо – червячная фреза» такой вспомогательной поверхностью может быть поверхность прямобочной рейки. Боковые поверхности такой рейки будут иметь линейный контакт как с поверхностью обработанного колеса, так и с производящей поверхностью червячной фрезы. Эти линии будут пересекаться в общей точке контакта всех трех поверхностей.

Использование этих положений позволяет существенно упростить расчеты обкаточного инструмента. По заданному тоцовому профилю зубьев детали и выбранному радиусу начального цилиндра рассчитывается профиль вспомогательной рейки в нормальной плоскости. Затем по выбранным начальному радиусу инструмента и углу скрещивания осей рассчитывается его торцовый профиль. Для эвольвентного зацепления, при котором профиль вспомогательной рейки является прямобочным, стало возможным стандартизировать его: «исходный реечный контур» для детали и «исходный производящий контур» для инструмента.

Это позволило создать целые системы проектирования зубчатых передач и зуборезных инструментов. Однако при расчете зуборезных инструментов для сокращения времени проектирования часто используют упрощения. Например, основной червяк червячной фрезы, который должен быть эвольвентным, заменяют архимедовым, имеющим в осевом сечении прямолинейный профиль. Режущую кромку фрезы в ее передней плоскости также заменяют прямолинейной для более удобного ее контроля. Чтобы уменьшить погрешность профиля фрезы для многих червячных фрез, передний угол принимается равным нулю. В результате ухудшаются условия резания, что снижает стойкость таких фрез.

Для твердосплавных фрез требуется упрочнение режущих кромок, поэтому должны приниматься отрицательные значения передних углов. В связи с этим возникла задача выявить степень влияния основных параметров червячной фрезы на отклонения ее профиля от теоретически требуемого при замене теоретических криволинейных кромок на прямолинейные.

На основе разработанных теоретически точных зависимостей для расчета червячных фрез в различных плоскостях проведен анализ степени влияния лимитирующих параметров фрез на отклонение профиля от теоретически точного. Расчеты необходимо производить по теоретически точ-

ным зависимостям и с большим числом значащих цифр. Как показали исследования, наибольшее влияние на отклонение профиля от теоретического оказывают диаметр фрезы и передний угол (рис. 1, 2). В качестве типового примера на рис. 1 и 2 приведены графики, иллюстрирующие степень влияния этих параметров для фрезы $m=4$. Как видно из схемы (рис. 1, 2), с уменьшением диаметра и увеличением абсолютного значения переднего угла отклонения профиля возрастают.

На практике профиль зуба на левой и правой сторонах пластинки делают прямолинейным и с одинаковым углом, в то время как в теории эти углы должны быть различны. Это обстоятельство вносит серьезные погрешности нарезаемого зуба. Это одно из ограничительных факторов эффективного использования твердосплавных пластинок.

На основе анализа возможных путей повышения эффективности можно предложить 2 пути решения вопроса по применению двухсторонних пластинок.

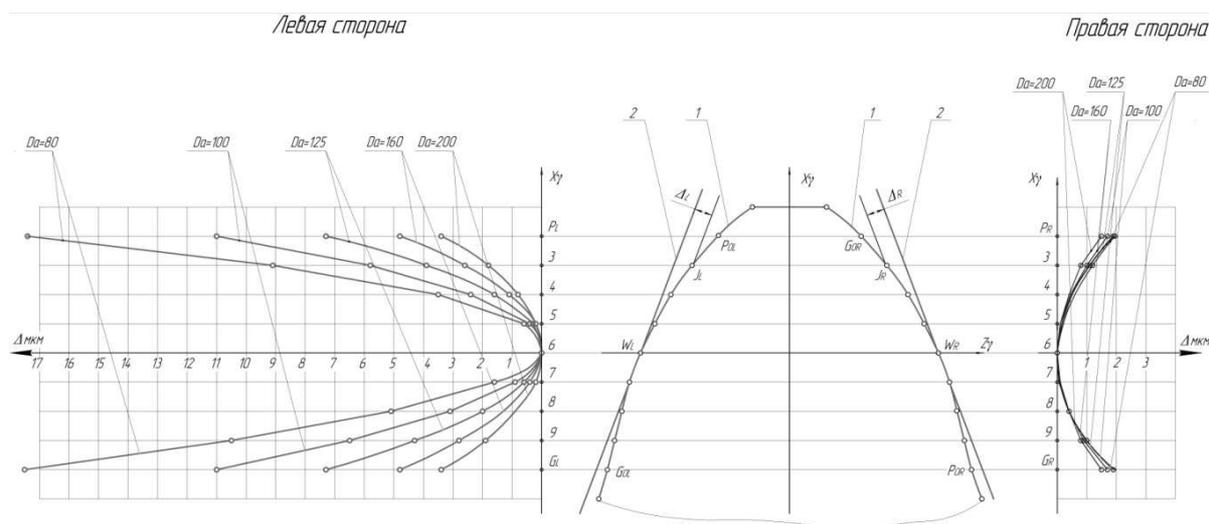


Рис. 1. Влияние диаметра на величину отклонения профиля червячной фрезы: $t = 4$ мм, $\gamma_A = -15^\circ$, число заходов $z_0=1$ (1 – теоретически точный профиль; 2 – профиль фрезы при замене его прямолинейным)

Первый путь: применять 2 корпуса с совершенно одинаковыми параметрами, но 1 корпус должен быть правозаходный, второй левозаходный. В этом случае пластинки можно использовать двусторонние, одну сторону на одном корпусе, другую на втором корпусе. Это сократит расход пластинок примерно в два раза.

Второй путь является более сложным. Боковые стороны неперетачиваемых твердосплавных пластинок следует изготавливать винтовыми. Их параметры должны быть строго рассчитаны из условия, чтобы при по-

вороте вдоль продольной оси сохранялись требуемые углы профиля. Реализовать такую форму пластинок можно при заточке их в специальном технологическом корпусе, параметры которого должны быть строго рассчитаны.

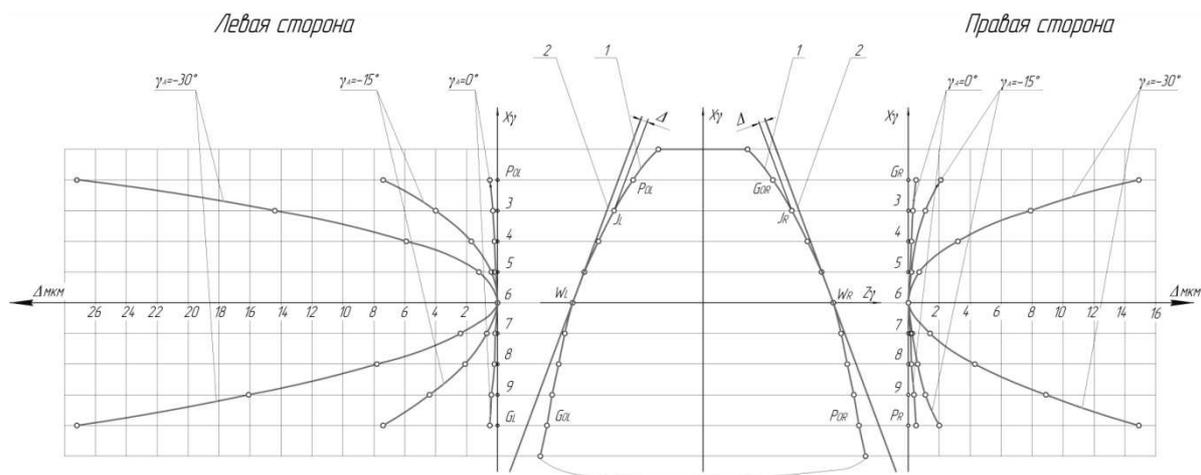


Рис.2. Влияние абсолютного значения переднего угла на величину отклонения профиля червячной фрезы: $D_{a0}=125$ мм, $t = 4$ мм, $z_0=1$ (1 – теоретически точный профиль; 2 – профиль фрезы при замене его прямолинейным)

Для того чтобы повысить точность таких фрез и получить требуемую форму и размеры задних поверхностей, необходимо решить вопрос технологического плана, а именно провести расчет профиля шлифовального круга и его установки, при котором будет обеспечена требуемая точность. Комплекты пластинок при шлифовании должны обрабатываться за одну установку.

Чтобы снизить накопленную погрешность шагов пластинки при эксплуатации, при заточке и шлифовании задней поверхности, пластинки должны располагаться в одном и том же порядке. Для этого необходимо нумеровать на каждой пластинке её порядковый номер и номер гнезда, в котором она должна располагаться.

Наиболее эффективным способом использования подобных фрез можно считать изготовление твердосплавных реек, на которых располагаются режущие зубья, возможно также составление таких реек пластин, склеенных в одну рейку. При этом, конечно, необходимо учитывать толщину слоя термостойкого клея между пластинками.

Одним из путей более экономного расхода пластинок можно считать возможность их перешлифовки по задней поверхности с последующим покрытием или без него.

Использование предложенных рекомендаций может существенно повысить точность червячных фрез.

Список литературы

1. Методология проектирования червячных фрез. Инновационный подход: монография / Г.А. Нуждин [и др.]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 170 с.

2. Борискин О.И., Стаханов Н.Г., Якушенков А.В. Специфика сопряжения поверхностей детали и инструмента, образующих цилиндрическую винтовую пару с перекрещивающимися осями // Успехи современного естествознания. 2005. №3. С.10-12.

3. Борискин О.И. Методология оптимизации обкаточного инструмента: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2001. 190 с.

Борискин Олег Игоревич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, imstulgu@pochta.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Стаханов Николай Георгиевич, канд. техн. наук, проф., imstulgu@pochta.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Якушенков Александр Владимирович, канд. техн. наук, доц, imstulgu@pochta.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Хлудов Сергей Яковлевич, д-р техн. наук, проф, imstulgu@pochta.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Горынина Ирина Вадимовна, студентка, imstulgu@pochta.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF INVOLUTE PROFILE HOBS WITH HARD-ALLOY SMP

O.I. Boriskin, N.G. Stakhanov, S.I. Hludov, A.V. Yakushenkov, I.V. Gorynina

The analysis results of the influence degree of their basic paramentres on the profile deviation of hobs from the theoretically required and the recommendations for their minimization were described on the basis of the theoretically accurate relations worked out by the authors.

Key words: worm mills, hard-allow SMP, profile, optimization, deviation.

Boriskin Oleg Igorevich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, director of Polytechnical Institute, imstulgu@pochta.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Stakhanov Nikolay Georgiyevich, candidate of technical sciences, professor, imstulgu@pochta.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Hludov Sergey Yakovlevich, doctor of technical sciences, professor, imstulgu@pochta.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Yakushenkov Alexander Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, imstulgu@pochta.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Gorynina Irina Vadimovna, student, imstulgu@pochta.ru. Russia, Tula, Tula State University

УДК 536.531

ОСОБЕННОСТИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ШЕВИНГОВАНИЯ-ПРИКАТЫВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

А.А. Маликов, А.В. Сидоркин

Рассмотрены практические аспекты построения измерительной системы, предназначенной для непрерывного многоканального измерения и регистрации температуры вращающихся частей технологических систем. Уделено существенное внимание конструкции оправки и токосъемного узла, используемых для передачи слаботоочного сигнала с нескольких термометров сопротивления, установленных на вращающемся инструменте – шевере-прикатнике.

Ключевые слова: измерение, сигнал, температура, шевингование-прикатывание, вращающийся объект, датчик, термометр сопротивления.

Уходят в прошлое классические методы непосредственной регистрации величины изменений сопротивлений различных датчиков, основанные на использовании автоматических самопишущих мостов со следящей системой уравнивания, а также комплексов, состоящих из преобразователей и устройств шлейфовой регистрации на световом и бумажном носителях.

В XXI веке тенденция преобразования аналоговых сигналов в цифровые, обработка и регистрация их в памяти ПЭВМ (на внешних или внутренних носителях) становится практически всеобъемлющей.

Как и в случае измерений температуры вращающихся частей технологических систем, подробно рассмотренном в статье [1], в составе измерительной системы, помимо объекта измерения – шевера-прикатника и установленных на нем термометров сопротивления, присутствуют преобразователь «сопротивление – напряжение» и аналогово-цифровой преобразователь, сопряженный с ПЭВМ посредством интерфейса USB – так называемый USB-осциллограф. Преобразователь «сопротивление – напряжение» должен запитываться от высокостабильного двуполярного источника питания, выдающего напряжения порядка $\pm 12...15$ В при токе нагрузки

не менее 0,1 А на каждый канал. При проведении экспериментальных исследований авторами было установлено, что применение стандартных блоков питания от ПЭВМ форм фактора АТ или АТХ дает вполне приличные результаты. Эти источники питания обладают высокой стабильностью выходных напряжений, малым уровнем пульсаций и помех.

Несомненным достоинством такого варианта компоновки измерительной системы является возможность осуществления параллельной многоканальной регистрации данных, поступающих от нескольких термометров, установленных на различных элементах технологической системы либо на различных поверхностях или участках поверхности одного элемента, в рассматриваемом случае – шевера-прикатника.

Упрощенная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1, где 1 – объект исследования – компонент технологической системы (в рассматриваемом примере – инструмент); 2 – термометр сопротивления; 3 – токосъемное устройство; 4, 6 – экранированные измерительные кабели с разъемами; 5 – кабель и разъем питания; 7 – стандартный USB-кабель с интерфейсными разъемами типа «А» и «В»; 8 – преобразователь «сопротивление – напряжение»; 9 – двуполярный БП ±12В; 10 – USB-осциллограф; 11 – ПЭВМ, оснащенная соответствующими драйверами и пакетом прикладных программ «USB-осциллограф».

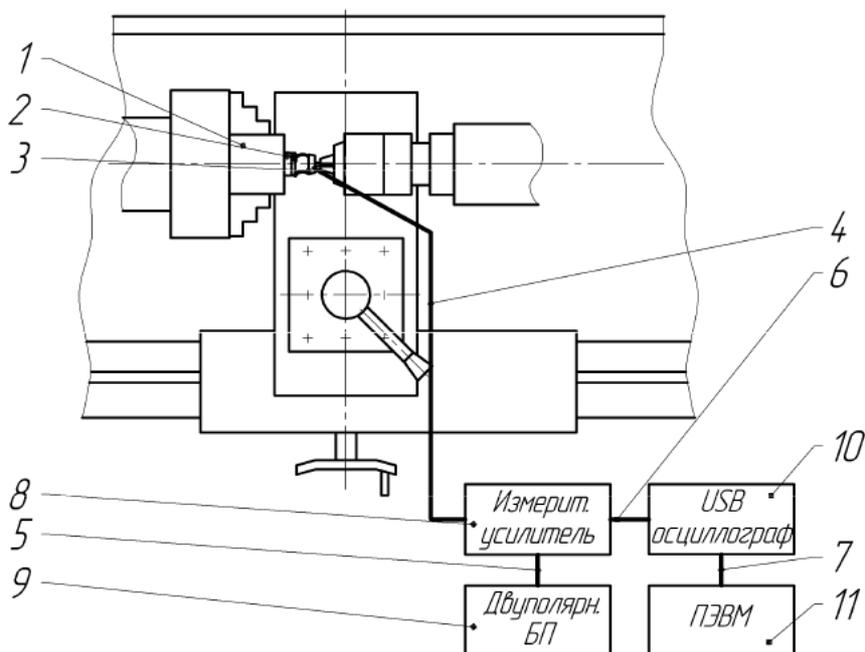


Рис. 1. Схема экспериментально-измерительной установки

Нагрев элементов технологической системы 1 (в рассматриваемом примере – режущих зубьев инструмента) вызывает изменение (увеличение) сопротивления термометра 2, включенного посредством экранированного измерительного кабеля 4 в цепь отрицательной обратной связи

преобразователя «сопротивление – напряжение». При этом передача электрического сигнала с чувствительного элемента термометра, установленного на вращающемся объекте 1, осуществляется посредством адаптера с размещенными на нем изолированными токосъемными кольцами на неподвижные токосъемники, размещенные, в свою очередь на изолированных основаниях, установленных на технологическом оборудовании посредством кронштейна.

Для целого ряда случаев требуется проведение измерений температуры в двух диаметрально противоположных точках инструмента. Это требует применения двух плоских термометров сопротивления. Нетрудно догадаться, что как при дискретной, так и при непрерывной регистрации температуры наличие гальванической связи между двумя двухпроводными каналами измерения является недопустимым. Следовательно, корпус оправки в данном случае должен быть оснащен посадочной поверхностью, позволяющей производить установку четырех токосъемных колец в сборе с изоляторами. В этом случае, интересующий фрагмент эскиза, иллюстрирующий оригинальную конструкцию оправки, представлен на рис. 2.

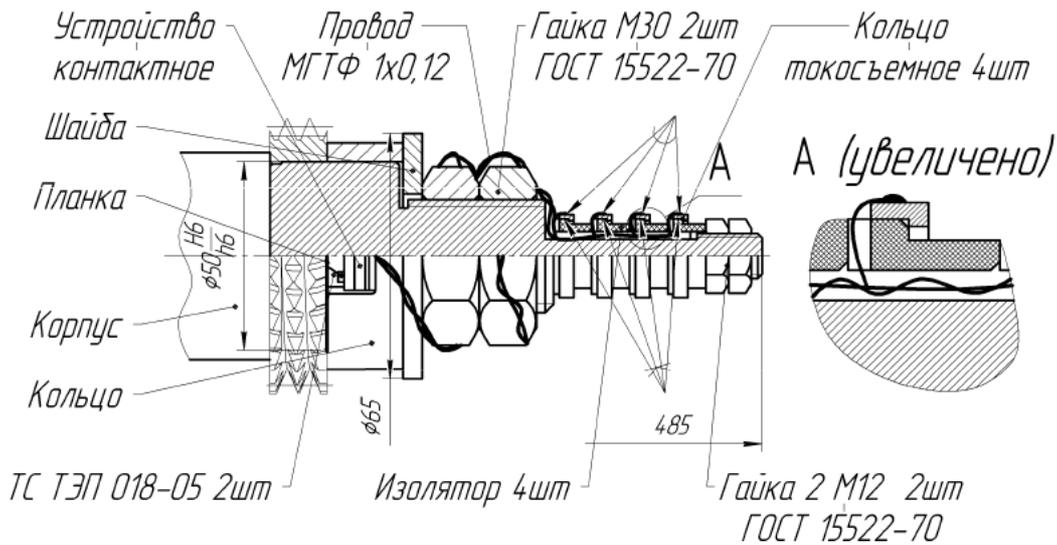


Рис. 2. Эскиз оправки с четырьмя токосъемными кольцами в сборе

Процедура установки термометра сопротивления на оправку аналогична рассмотренной ранее [2] за исключением необходимости еще большей сноровки и тщательности ввиду того, что количество одновременно монтируемых термометров не один, а два.

Как видно из рис. 2, в конструкцию токосъемной системы по сравнению с рассмотренной в [2] внесены существенные изменения. Во-первых, цилиндрическая поверхность корпуса, предназначенная для установки токосъемных узлов, выполнена более протяженной. Во-вторых, свободный конец посадочной поверхности имеет резьбу М12. В-третьих, на ее

гладком участке (с заходом на резьбу М30) выполнен паз-канал шириной 4 мм и глубиной 2 мм, предназначенный для прокладки четырех сигнальных проводов МГТФ 1х0,12 (рис. 3).

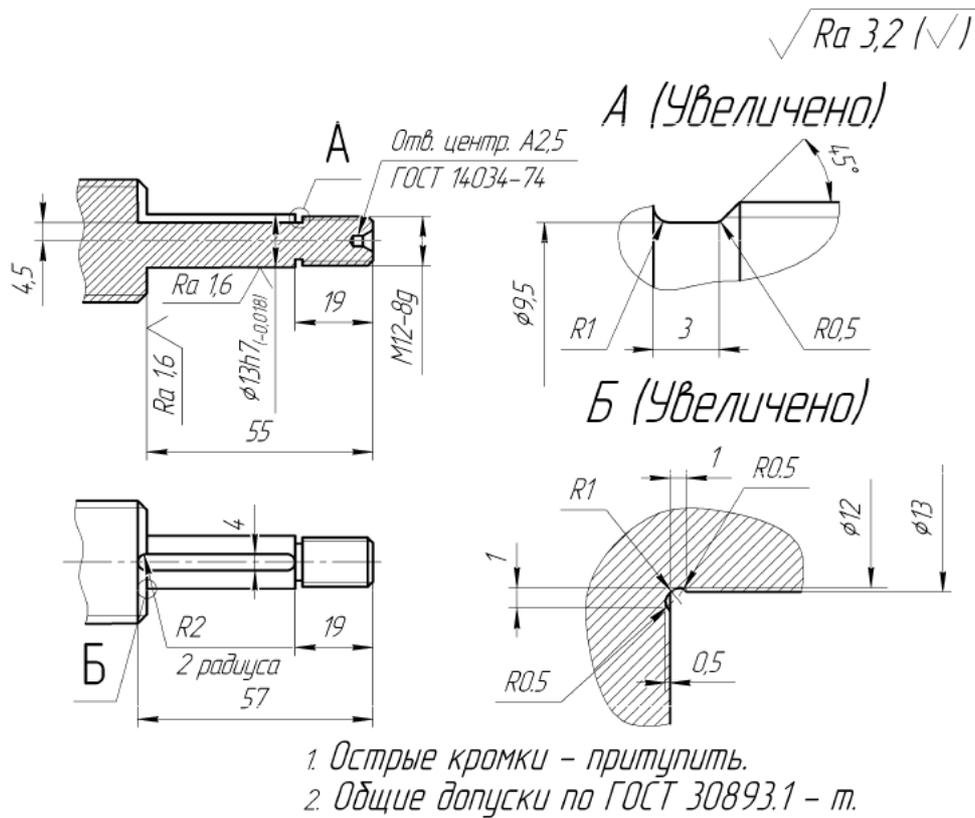
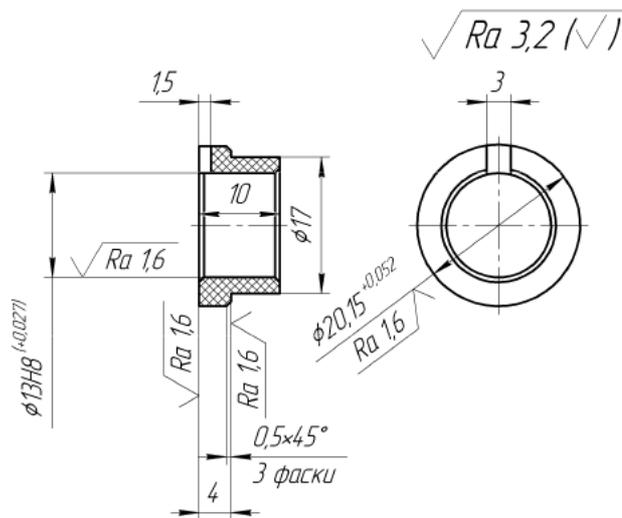


Рис. 3. Эскиз корпуса оправки для установки четырех токосъемных колец

Особенность сборки токосъемного узла заключается в том, что токосъемные кольца не приклеиваются к корпусу оправки и друг к другу, а удерживаются от проскальзывания за счет прижима гайкой и контргайкой. При этом провода, подключаемые к термометрам сопротивления, свитые в пары, подводятся к токосъемным кольцам через паз-канал, профрезерованный в корпусе оправки. Каждый провод подводится к соответствующему токосъемному кольцу через индивидуальный паз, находящийся в торцевой плоскости изолятора (рис. 4). Изоляторы, рассматриваемые в рамках настоящей статьи, были получены при помощи 3D-печати [3].

При сборке токосъемного узла (особенно при затягивании гаек) необходимо тщательно следить за тем, чтобы изоляторы с установленными на них кольцами не прокручивались относительно паза-канала. Несоблюдение этого условия может привести к повреждению изоляции сигнальных проводов, отрыву их от контактных колец и ряду других неприятных последствий.

Следует также заметить, что при закручивании крепежных гаек не следует прилагать чрезмерных усилий, так как это может привести к смятию относительно непрочных деталей – изоляторов, выполненных из пластмасс. Кроме того, необходимо учитывать, что в процессе сборки электрических узлов, базирующихся на оправке, необходимо осуществлять периодическую проверку целостности изоляции и величины сопротивления термометров.



1. Наличие заусенцев – не допускается
2. Материал – Капралон ТУ 6-05-988-97
3. Общие допуски по ГОСТ 30893.1 – т.

Рис. 4. Эскиз детали «Изолятор»

Величина изменения сопротивления, поступающая на вход преобразователя «сопротивление – напряжение», преобразуются им в прямо пропорциональное напряжение и усиливается масштабным усилителем, объединенным с преобразователем в единый конструктив 8. Блок 8, помимо прочего, оснащен средствами точной балансировки «нуля» преобразователя, а также средствами калибровки двух (а, при необходимости, и большего числа) эквивалентных точек измерения (в рассматриваемом примере 0 и 100 °С). Блок 8 запитывается от двуполярного БП ±12В 9 посредством кабеля 5, оканчивающегося разъемом питания. Далее преобразованный в напряжение и усиленный сигнал поступает посредством экранированного измерительного кабеля 6 на вход USB-осциллографа 10.

В связи с тем, что большинство различных моделей USB-осциллографов, выпускаемых разными производителями, оснащаются входными блочными разъемами-розетками типа BNC с волновым сопротивлением 50 Ом, целесообразным, по мнению авторов, является оснащение измерительного блока 8 аналогичными вилками отечественного производства типа СР50-65Ф либо иностранного производства типа BNC. Это

дает возможность использования стандартных 50-омных соединительных кабелей 6, оканчивающихся с обеих сторон кабельными отечественными вилками типа CP50-74ПВ либо импортными – BNC.

USB-осциллограф 10 является, по сути, аналогово-цифровым преобразователем с развитым программным интерфейсом, реализованным в виде пакета прикладных программ «USB-осциллограф». Используемая авторами модель USB-осциллографа «DisCo2» выпускается производственной фирмой «Трейд-М» (г. Тула) и является практичным и недорогим прибором, позволяющим в двухканальном режиме отслеживать и производить оцифровку сигналов любой формы с частотой до 20 кГц на канал. Величина этого параметра является более чем достаточной для осуществления измерений в рассматриваемой области. Прибор обладает основными техническими характеристиками, которые отражены в таблице.

**Основные технические характеристики
USB-осциллографа «DisCo2»**

Количество каналов	2
Частота дискретизации	100 Гц ... 200 кГц
Глубина памяти: - чтение через буфер; - потоковое чтение	1126 отсчетов/канал (1 канал), 563 отсчетов/канал (2 канала) 64К отсчетов/канал (1 или 2 канала)
Входное напряжение	-20 ... +20 В (аппаратно 2 поддиапазона)
Разрядность АЦП	10 бит
Основная погрешность	0,125 %

Оцифрованные результаты измерений напряжения, прямо пропорционального величине сопротивления термометра, а, следовательно, и измеряемой температуре, передаются по USB-интерфейсу на ПЭВМ 11 (например, форм-фактора «Ноутбук»). Эти результаты могут быть визуализированы в режиме «Цифрового осциллографа» окне пакета «USB-осциллограф», установленного на ПЭВМ (рис. 5). При этом становится возможным осуществление оперативного контроля температурных параметров процесса механической обработки. Для осуществления контроля рассматриваемых параметров на протяжении всего цикла обработки удобно использовать режим «Самописец», позволяющий сохранять оцифрованные данные в формате, удобном для восприятия другими приложениями, например, Microsoft Excel.

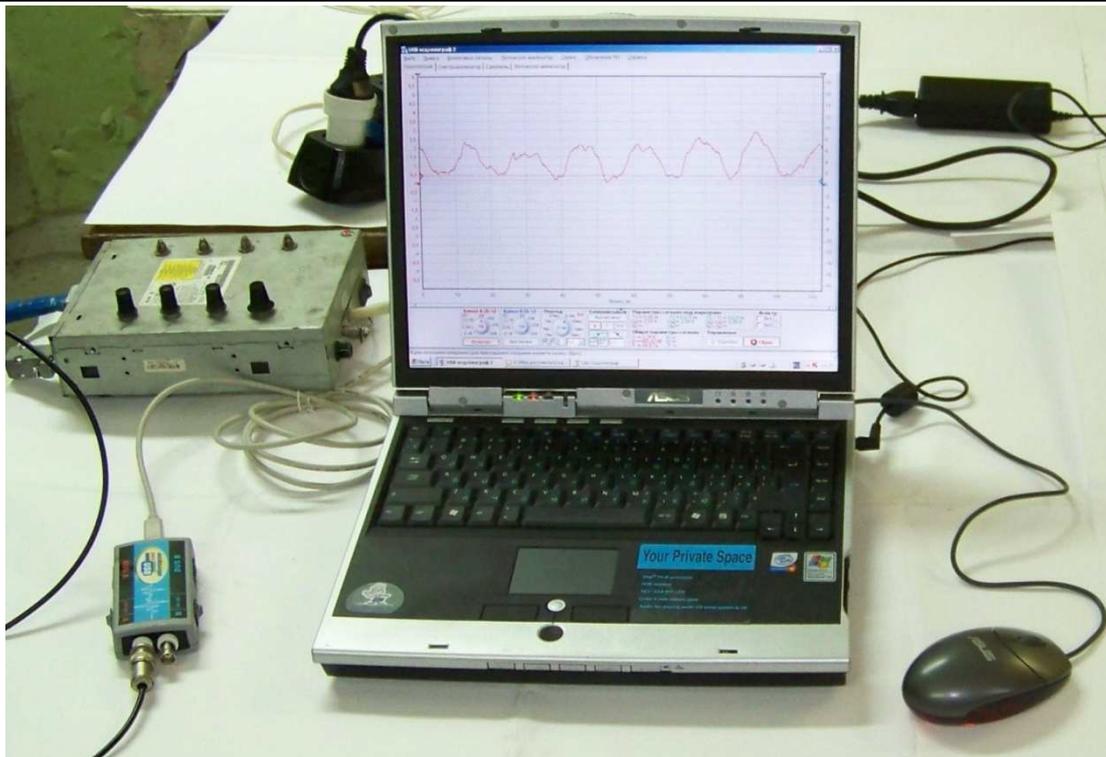


Рис. 5. Аналогово-цифровой тракт измерительного комплекса

Питание преобразователя и усилителя 8, как уже было отмечено выше, осуществляется от внешнего высокостабильного БП, обеспечивающего также высокие точностные показатели работы измерительной схемы. Во избежание возникновения помех и наводок все тракты измерительной системы соединены между собой экранированными кабелями, экраны которых, а также экранированные корпуса измерительных приборов и устройств заземлены, кроме того, заземляется также нулевой провод двупольного источника питания.

Список литературы

1. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Некоторые особенности практической реализации процесса дискретной регистрации температуры вращающихся частей технологических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 8. Ч. 2. С. 78 – 86.
2. Сидоркин А.В. Технологическая оснастка для измерения температуры в зоне обработки цилиндрических колес шевингованием-прикатыванием // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 8. С. 68 – 73.
3. Использование 3D-принтеров для прототипирования деталей изоляторов токосъемных узлов / А.А. Маликов, Н.Д. Феофилов, А.В. Сидоркин, Е.С. Янов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 8. Ч. 1. С. 17 – 23.

Маликов Андрей Андреевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, andrej-malikov@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сидоркин Андрей Викторович, канд. техн. наук, инж.-исследователь, alan-a@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

**PECULIARITIES OF MULTICHANNEL MEASURING AND RECORDING
TEMPERATURES DURING SHAVE-ROLLING OF THE SPUR GEAR**

A.A. Malikov, A.V. Sidorkin

We consider the practical aspects of construction of the measuring system for continuous multi-channel measuring and recording the temperature of the rotating parts of technological systems. Paid considerable attention to the design of the mandrel and the collector node, used to transmit the signal from several low-current resistance thermometers mounted on a rotating tool - shaver-roller.

Key words: measurement, signal, temperature, shave-rolling, rotating object, the sensor resistance thermometer.

Malikov Andrey Andreevich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, andrej-malikov@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Sidorkin Andrey Victrovich, candidate of technical sciences, research engineer, alan-a@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 534.2

**АКУСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ
ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

А.С. Дударев

В соответствии с актуальными экологическими требованиями стандарта ИКАО приводится анализ звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей. Проведены расчеты конструктивных характеристик элементов звукопоглощающих конструкций, содержащих резонаторы Гельмгольца для определения частот спектра гашения шума. Предложенная методика позволяет назначить конструктивные параметры звукопоглощающих конструкций, а именно длины горловины, площадь сечения горловины, объема резонатора в соответствии с требуемыми частотами поглощения звука для высокочастотной и низкочастотной областей. Показано, что влияние объема полости резонатора превалирует над влиянием площади сечения горловины при относительно больших (свыше 3 мм) длинах горловины.

Ключевые слова: резонатор Гельмольца, звукопоглощающая конструкция, спектр, частота, шум, звук, горловина, гашение.

При развитии конкурентоспособной авиационной техники и в условиях ужесточения международных экологических стандартов, устанавливаемых ИКАО, проблема нахождения акустических свойств звукопоглощающих конструкций (ЗПК) самолётов очень актуальна.

Вновь разрабатываемые ЗПК должны обеспечивать глушение шума на критических для звукового восприятия человека частотах. Следует разработать методику определения конструктивных характеристик элементов ЗПК с таким расчетом, чтобы гашению подвергались те частоты спектра шума, которые наиболее характерны для конкретной конструкции реактивного двигателя, в составе которого и будет применена данная ЗПК. Возникает необходимость выделения гармонических составляющих из сложных звуковых колебаний (шума).

Для таких целей используется акустический резонатор [1 – 5]. Типичный пример акустической системы, реагирующей лишь на одну частоту, – сосуд сферической или другой формы с открытой горловиной (рис. 1), который называется резонатором Гельмгольца.

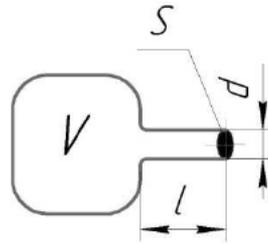


Рис. 1. Резонатор Гельмгольца

Воздух в горловине – колеблющаяся масса. При смещении этой массы, например, в сторону сферического объема V воздух в этом объеме слегка сжимается, и возникающие силы избыточного давления выполняют функцию возвращающей силы. Если площадь горловины равна S , а её длина – L , то для скорости звука c собственная частота колебаний воздуха в горловине, или частота резонатора Гельмгольца (Гц) [6],

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot L}}, \quad (1)$$

где c – скорость звука, м/с; S – площадь горловины, м²; V – объем камеры резонатора, м³; L – длина горловины, м.

Из рис. 1 и выражения (1) следует, что основной функциональный конструктивный элемент – это горловина, которая, собственно, и определяет частоту гасимых резонатором колебаний.

Для соотнесения размеров звукопоглощающих конструкций с частотами слышимого шума приняли следующие диапазоны изменения размеров и объема резонатора: $L = 0,1 \dots 10$ мм; $S = 1$ мм²...1 см²; $V = 0,1 \dots 100$ см³.

Проанализируем зависимости собственной частоты колебаний резонатора при фиксировании значений одного из его параметров.

Результаты математического моделирования в среде Matchcad резонатора Гельмгольца при фиксировании одного из параметров, входящих в выражение (1), и при изменении двух других приведены в виде графиков на рис. 2 – 4.

Вначале рассмотрим зависимость собственной частоты от площади поперечного сечения горловины. Зафиксируем объем полости резонатора на уровне $V = 50 \text{ см}^3$. Если изменять длину горловины L в диапазоне от 0,1 до 10 мм, то получим семейство кривых, приведенных на рис. 2, из рассмотрения которого можно сделать следующие выводы.

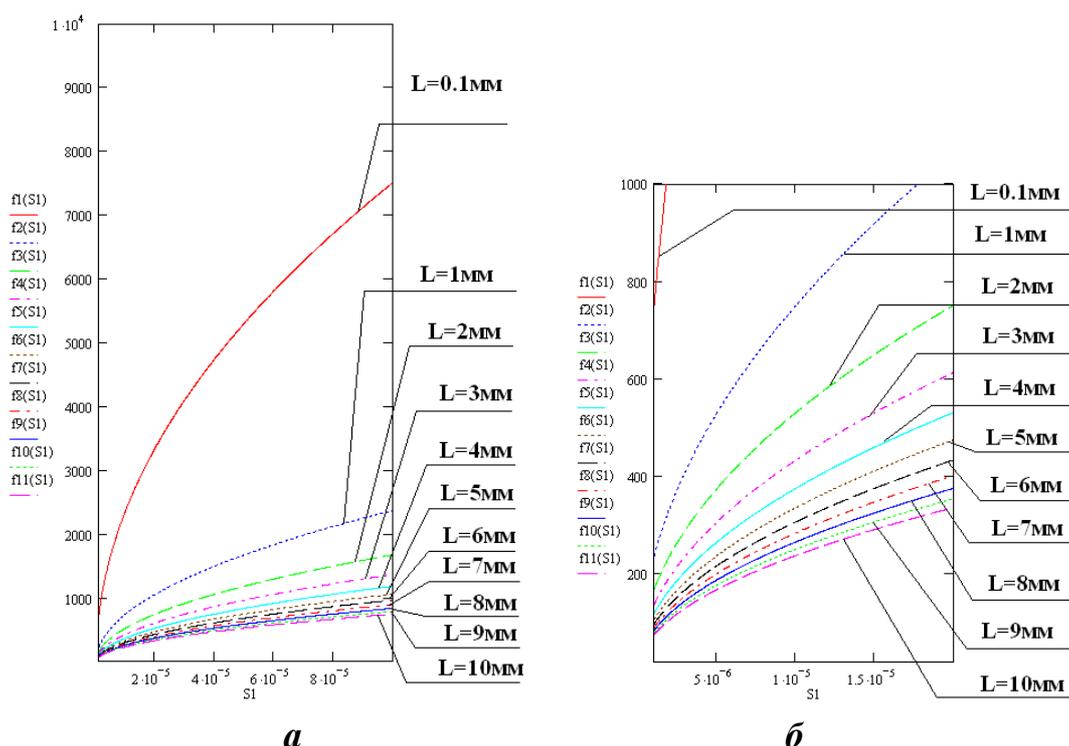


Рис. 2. Зависимость частот собственных колебаний резонатора Гельмгольца от площади поперечного сечения горловины при фиксированном объеме полости резонатора для высокочастотной (а) и низкочастотной (б) областей

Для гашения шума в высокочастотном диапазоне (свыше 2,5 кГц) длина горловины должна составлять не более десятых долей миллиметра. Горловины с длинами в пределах 1...10 мм позволяют гасить шум в диапазоне частот $f = 200 \text{ Гц} \dots 2,5 \text{ кГц}$. Для гашения низкочастотных колебаний ($f < 100 \text{ Гц}$) необходима длина горловины не менее 10 мм.

Если зафиксировать длину горловины на уровне $L = 5 \text{ мм}$, то при изменении объема полости резонатора в пределах $V = (0,1 \dots 100) \text{ см}^3$ получаем семейство кривых, из рассмотрения которых можно сделать следующие заключения.

Для гашения шума в высокочастотной области значение величины объема полости резонатора должно быть в диапазоне от 0,5 до 10 см³. Полости резонатора с объемами в пределах от 10 до 50 см³ позволяют обеспечить гашение шума практически во всем диапазоне частот. Гашение шума на низких частотах ($f = 100$ Гц) обеспечивают полости с объемом 60...80 см³.

Можно утверждать, что для гашения шума в высокочастотной области необходимо иметь резонаторы Гельмгольца с длиной горловины в пределах нескольких десятых долей миллиметра и объемом полости примерно 5 см³. Большая часть резонаторов должна иметь длины горловин в пределах 1...10 мм при объемах полостей 10...50 см³. В то же время наиболее низкие частоты гасятся резонаторами, имеющими длину горловины примерно 10 мм при объеме полости 60...80 см³.

Перейдем к рассмотрению зависимости собственной частоты резонатора от объема его полости. Вначале зафиксируем площадь поперечного сечения горловины на уровне $S = 50$ мм². Если изменять длину L резонатора в пределах от 0,1 до 10 мм, получаем семейство кривых, приведенных на рис. 3. Из рассмотрения приведенных зависимостей очевидно, что собственная частота резонатора резко падает при увеличении объема полости до 5 см³, а увеличение объема полости свыше 40 см³ практически не влияет на собственную частоту резонатора.

Средние частоты в спектре шума могут быть погашены резонаторами, имеющими объем полости от 5 до 40 см³. При этом длины горловин резонаторов могут находиться в пределах от 2 до 5 мм. Если объем полости резонатора не превышает 5 см³, то шум в высокочастотной части спектра может быть погашен практически при любой длине горловины. При этом обеспечить снижение собственной частоты резонатора в целях гашения наиболее низкочастотных шумов увеличением длины горловины не удастся (в пределах наложенных конструктивных ограничений).

Зафиксируем длину горловины резонатора на уровне $L = 5$ мм и будем изменять площадь поперечного сечения горловины S от 1 до 100 мм². Получаем семейство кривых, из рассмотрения которых можно сделать заключение, что к резкому снижению собственной частоты резонатора приводит увеличение объема полости до 5 см³, а изменение объема полости в пределах 50...100 см³ на собственную частоту резонатора практически не влияет. При этом практически весь диапазон частот может быть перекрыт резонаторами, имеющими площадь поперечного сечения горловины в пределах 1...10 мм².

Получаем следующие выводы: для гашения шумов в наиболее низкочастотной части спектра необходимо иметь резонаторы с площадью поперечного сечения горловины примерно 1 мм² и длиной примерно 10 мм, а высокочастотные шумы целесообразнее всего гасить резонаторами,

имеющими площадь поперечного сечения горловины примерно 10 мм^2 , выбирая длину горловины из конструктивных соображений. При этом объем полостей для гашения высокочастотных шумов должен быть не более 5 см^3 , а для гашения низкочастотных шумов – не менее 50 см^3 .

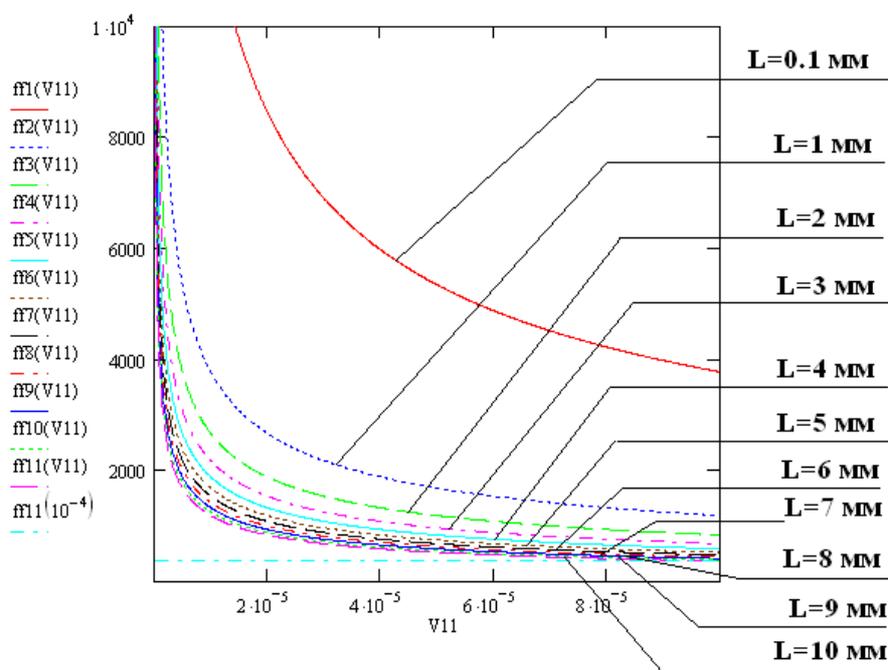


Рис. 3. Зависимость частоты собственных колебаний резонатора Гельмгольца от объема V его полости при различных длинах L и фиксированной площади поперечного сечения горловины

Наконец, рассмотрим зависимость собственной частоты резонатора от длины его горловины. Вначале зафиксируем величину площади поперечного сечения горловины на уровне $S = 50 \text{ мм}^2$. Изменяя объем полости резонатора V от 10 до 100 мм^3 , получим семейство кривых, показанных на рис. 4, из рассмотрения которых следует, что собственная частота резонатора резко возрастает при уменьшении длины горловины от 1 мм до долей миллиметра. С другой стороны, увеличение длины горловины в диапазоне от 3 до 10 мм приводит к весьма медленному снижению собственной частоты резонатора. При этом резонаторы с длиной горловины $1...3$ мм позволяют гасить шум в наиболее широкой полосе частот.

Если теперь при фиксированном объеме резонатора $V = 50 \text{ мм}^3$ построим семейство кривых, соответствующих изменению площади поперечного сечения горловины S в пределах от 1 до 100 мм^2 , то полученные кривые будут свидетельствовать о том, что шум практически во всем диапазоне частот может быть погашен при измерении длины горловины резонатора в пределах от 1 до 10 мм.

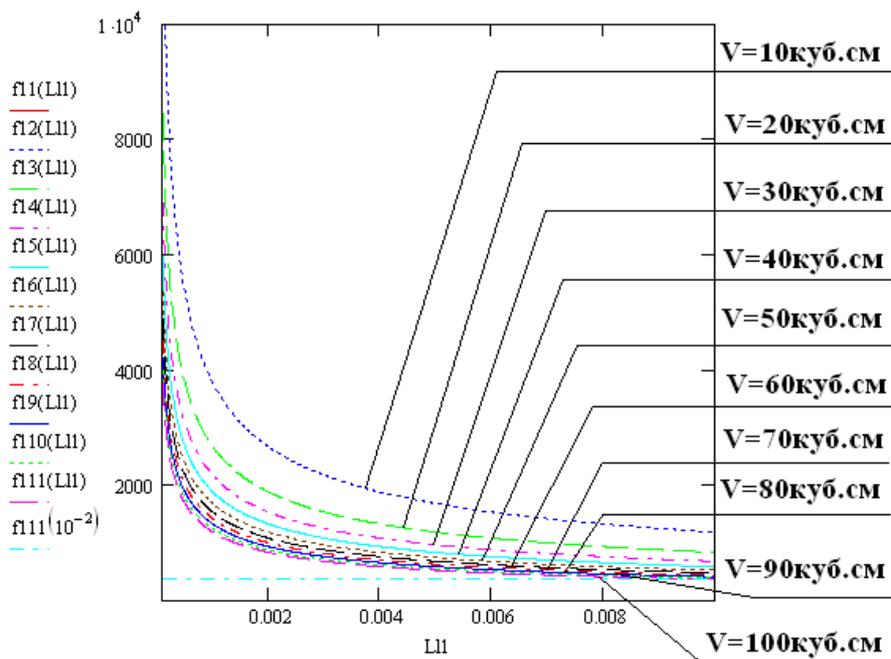


Рис. 4. Зависимость частоты собственных колебаний резонатора Гельмгольца от длины его горловины L при различных объемах V полости и фиксированной площади сечения горловины

В целом, объем полости резонатора и площадь сечения его горловины влияют на собственную частоту резонатора разнонаправленно. Влияние объема полости превалирует над влиянием площади сечения горловины при относительно больших (свыше 3 мм) длинах горловины. Наоборот, при малых (менее 1 мм) длинах горловины влияние площади сечения горловины на собственную частоту резонатора превалирует над влиянием на этот параметр объема полости резонатора.

Анализ графиков зависимостей собственной частоты резонаторов от их размеров позволяет целенаправленно подбирать размеры отдельных резонаторов Гельмгольца послойно, а также общие размеры звукопоглощающего элемента таким образом, чтобы гашению подвергались заранее выбранные частоты, определенные на основе анализа спектра шума.

Наболее распространенная конструкция резонаторных поглотителей – перфорированный лист, расположенный на расстоянии от стенки [7, 8]. Такая конструкция может рассматриваться как ряд резонаторов [6].

На рис. 5 представлена расчетная схема фрагмента ЗПК сэндвичевой конструкции с одним слоем перфорированных отверстий (существуют более сложные ЗПК с двумя рядами соосных отверстий).

На основании выражений из [6], после подстановки параметров листа с резонаторными поглотителями (рис. 5) для равномерного распределения отверстий в перфорированном листе резонаторная частота

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{a^2 \cdot h \cdot (t + 0,5\sqrt{\pi \cdot S})}}, \quad (2)$$

где a – расстояние между отверстиями, м; h – расстояние от стены, м; t – толщина листа резонаторных поглотителей, м.

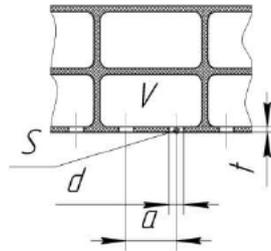


Рис. 5. Фрагмент резонаторного поглотителя

В известных конструкциях ЗПК [9], например, применяемых в авиационных двигателях ПС-90А2 и двигателе SaM-146 самолёта SuperJet 100, конструктивно длина горловин резонаторов близка к 1 мм, что говорит о настройке ЗПК на гашение шума в высокочастотной области.

Так, для авиационного двигателя ПС –90А2 наиболее критичными, подлежащими гашению в первую очередь являются частоты: $f_1 = 330$ Гц; $f_2 = 670$ Гц; $f_3 = 1,34$ кГц; $f_4 = 2,67$ кГц; $f_5 = 2,75$ кГц.

Исходя из указанного набора частот, на основе проведенного анализа зависимостей возможно разработать и внедрить новые звукопоглощающие конструкции.

Таким образом, всегда можно подобрать размеры горловины и объем полости резонатора таким образом, чтобы он работал на задаваемой разработчиком частоте [10, 11].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор №02.G25.31.0016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ №218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Список литературы

1. Патент 2194171 РФ. Глушитель шума / О.В. Плицына, В.Т. Плицын, С.К. Иванова Оpubл. 10.12.2002. Бюл. № 34.
2. Берсудский В.Е., Крысин В.Н., Лесных СИ. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций. М.: Машиностроение, 1975. 282 с.
3. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым наполнителем. М.: Машиностроение, 1982. 151 с.

4. Руденко О.В., Хирных К.Л. Модель резонатора Гельмольца для поглощения интенсивности звука // Акустический журнал. 1990. Т. 36, № 3. С. 527 – 534.

5. Комкин А.И. Разработка современных методов расчёта и проектирования автомобильных глушителей шума с требуемыми характеристиками: автореф. дис.... д-ра техн. наук. С.-Петербург: БГТУ, 2012. 48 с.

6. Иофе В.К., Корольков В.Г., Сапожков М.А. Справочник по акустике М.: Связь, 1979. 312 с.

7. Дударев А.С. Расчёт количества отверстий в перфорированных звукопоглощающих конструкциях авиационных двигателей // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2014. № 2. С. 48 – 52.

8. Дударев А.С., Свирщёв В.И. Расчёт параметров перфорированной области с равносторонней треугольной и квадратной решеткой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 1. С. 180 – 185.

9. Дударев А.С. Анализ технологичности конструкций заполнителя звукопоглощающих панелей авиационных двигателей // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. №3 (72). С. 68 – 73.

10. Соболев А.Ф., Ушаков В.Г., Филиппова Р.Д. Звукопоглощающие конструкции гомогенного типа для каналов авиационных двигателей // Акустический журнал. 2009. Т.55. № 6. С. 749 – 759.

11. Комкин А.И. Оптимизация реактивных глушителей шума // Акустический журнал. 2010. Т. 56. №3. С. 373 – 379.

Дударев Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доц., fanta88@mail.ru, Россия, Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ACOUSTIC ANALYSIS OF THE SOUND-ABSORBING PANELS

A.S. Dudarev

The article in accordance with relevant environmental requirements of the ICAO standard provides an analysis of sound-absorbing structures of aircraft engines. Done calculations of structural characteristics of the elements of absorbent structures comprising resonators of Helmholtz to determine the frequency spectrum of the noise damping. The proposed method allows to assign the design parameters of the sound-absorbing structures, namely, the length of the neck, the cross-sectional area of the neck, the volume of the resonator in accordance with the required frequencies, the sound absorption for high-frequency and low-frequency areas. It is shown that the influence of the cavity volume of the resonator prevails over the influence of cross-sectional area of the neck with a relatively large (over 3 mm) lengths of the neck.

Key words: resonator of Helmholtz, sound design, range, frequency, noise, sound, mouth, quenching.

УДК 621.432

ВИРТУАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ СНЯТИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

И.В. Попов, П.В. Толмачев, Р.Н. Хмелев

Разработан виртуальный стенд для снятия статических и динамических характеристик ДВС различных типов. Программное обеспечение стенда базируется на имитационной динамической модели ДВС. Приведены результаты практического использования стенда для снятия статических и динамических характеристик ДВС.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, статические и динамические характеристики, виртуальный стенд.

Мощностные и экономические показатели двигателей внутреннего сгорания, а также показатели, характеризующие статические и динамические нагрузки на детали, их тепловую напряженность, шумоизлучение, дымность и токсичность, оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики приводимых ими машин [1]. По этим показателям оценивают эксплуатационные характеристики ДВС, степень их конструктивного совершенства и устанавливают соответствие двигателя тому или иному назначению. Для технических систем, функционирующих в установившихся и переходных режимах, выделяют статические и динамические характеристики.

К основным статическим характеристикам ДВС относятся скоростные, нагрузочные, регулировочные, регуляторные и многопараметровые (комбинированные). Эти характеристики получают для установившихся режимов работы ДВС в виде графиков зависимости показателей работы двигателя от одного из параметров, характеризующих режим его работы [1]. Традиционными методами определения статических характеристик ДВС являются методы стендовых испытаний в соответствии с ГОСТ 14846-81 «Двигатели автомобильные», ГОСТ 18509-88 «Дизели тракторные и комбайновые». В состав оборудования и приборов стенда входят тормоз и устройства для измерения крутящего момента, расходов топлива и воздуха, частоты вращения вала двигателя. Тормоз позволяет имитировать нагрузку двигателя тем или иным потребителем (генератором, трактором, автомобилем, судном, комбайном).

В то же время большинство ДВС значительную часть времени работают на неустановившихся режимах (пуска, разгона, наброса-сброса нагрузки, периодического изменения сопротивления), для которых характерно изменение внешней нагрузки, существенно влияющее на основные показатели двигателей. Для их обозначения при совпадении условий данного режима с условиями определения статистических характеристик используются принятые термины с добавлением слова «динамическая». Это указывает на дополнительную зависимость показателей двигателя как от времени, так и условий работы с конкретным потребителем мощности [2]. Динамическая характеристика позволяет решать ряд тягово-динамических задач в широком диапазоне изменения нагрузок и оборотов двигателя при его работе в различных условиях [2].

В процессе исследования влияния неустановившейся нагрузки на двигатель широко используется метод сравнения показателей ДВС при установившихся и неустановившихся режимах. Стационарная характеристика, снятая согласно ГОСТ 18509-88, является эталонной, к которой должны стремиться параметры ДВС в неустановившемся режиме [3]. Также для анализа неустановившихся режимов используется ГОСТ Р 55231-2012 «Системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) судовых, тепловозных и промышленных двигателей внутреннего сгорания». Исследования САРЧ проводятся при испытании двигателей по ГОСТ Р 53639-2009 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Приемка. Методы испытаний». В качестве оборудования дополнительно применяются гидротормозы, электрические или торсионные динамометры, тахометры, счетчики оборотов, максиметры, механические и электрические индикаторы для измерения максимального давления сгорания и давления в конце сжатия [3].

В соответствии с изложенным получение статических и динамических характеристик ДВС традиционными способами требует дорогостоящего оборудования и существенных временных затрат. В этой связи для определения характеристик ДВС актуальным является применение методов вычислительного эксперимента и виртуальных лабораторных стендов, которые могут рассматриваться как альтернатива натурным экспериментам и стендам.

В данной работе для построения характеристик ДВС различных типов предлагается использовать вычислительные эксперименты на виртуальном стенде, что позволит существенно сократить материальные и временные затраты, связанные с натурными экспериментами.

Интерфейс разработанного программного обеспечения приведен на рис. 1 и 2. Управление работой стенда осуществляется путем изменения нагрузки (момента сопротивления) дискретным образом или по заданному закону, а также воздействием на орган управления подачей топлива. Запуск стенда и его выключение осуществляются при помощи соответст-

вующих кнопок. Текущие значения нагрузки и подачи топлива отображаются во время работы под соответствующими органами управления двигателем.

В качестве математического описания использовалась имитационная динамическая модель ДВС [4], которая позволяет установить связи как основных конструктивных и эксплуатационных параметров, так и параметров систем двигателя с его статическими и динамическими характеристиками. Значения основных конструктивных и эксплуатационных параметров ДВС задаются с помощью соответствующих элементов меню. Результаты работы ДВС отображаются в виде графиков моментов (движущего и момента сопротивления) и угловой скорости. Также осуществляется запись основных показателей работы ДВС в текстовый файл.

В качестве примера на рис. 1 – 4 приведены результаты вычислительных экспериментов по исследованию установившихся и переходных режимов работы дизеля ТМЗ-450Д. В данном случае установившийся режим работы ДВС может быть получен как частный случай переходного путем воздействия на органы управления двигателем с целью обеспечения постоянства средней угловой скорости и равенства движущего момента моменту сопротивления.

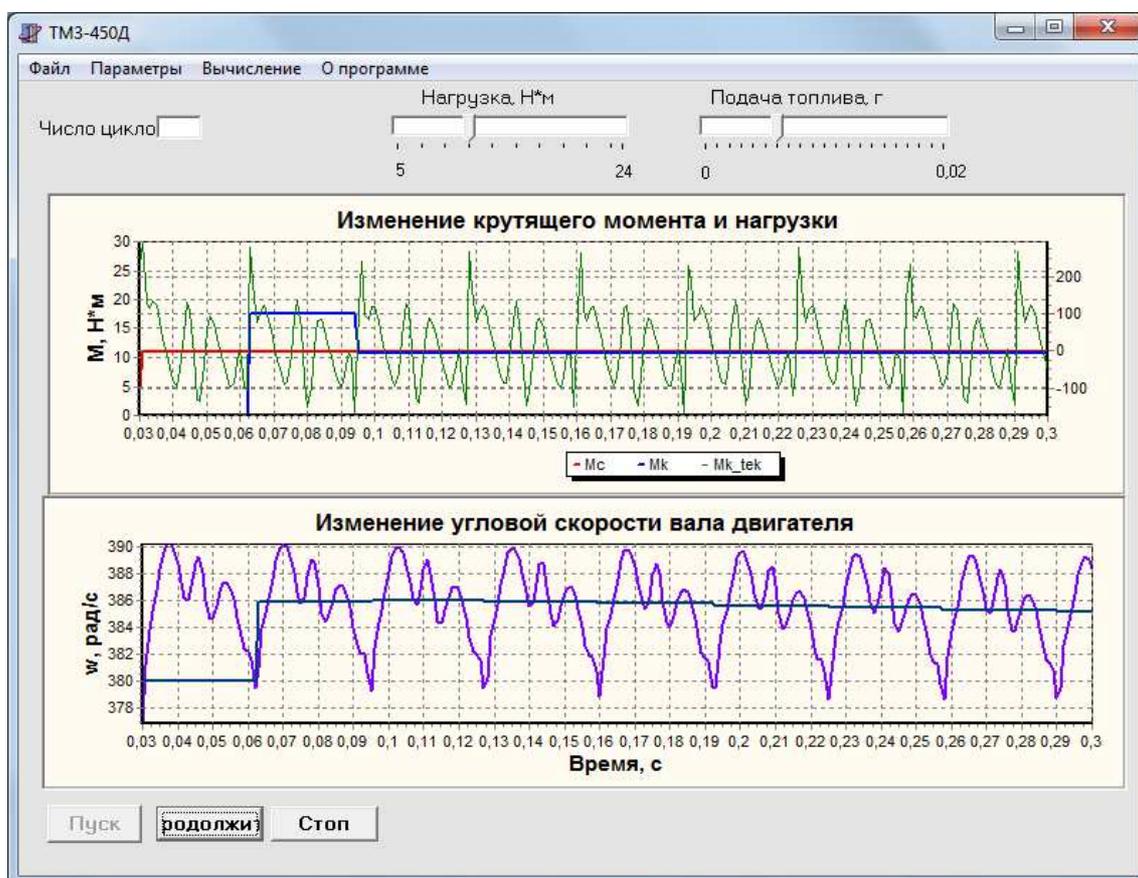


Рис. 1. Имитация установившегося режима работы двигателя

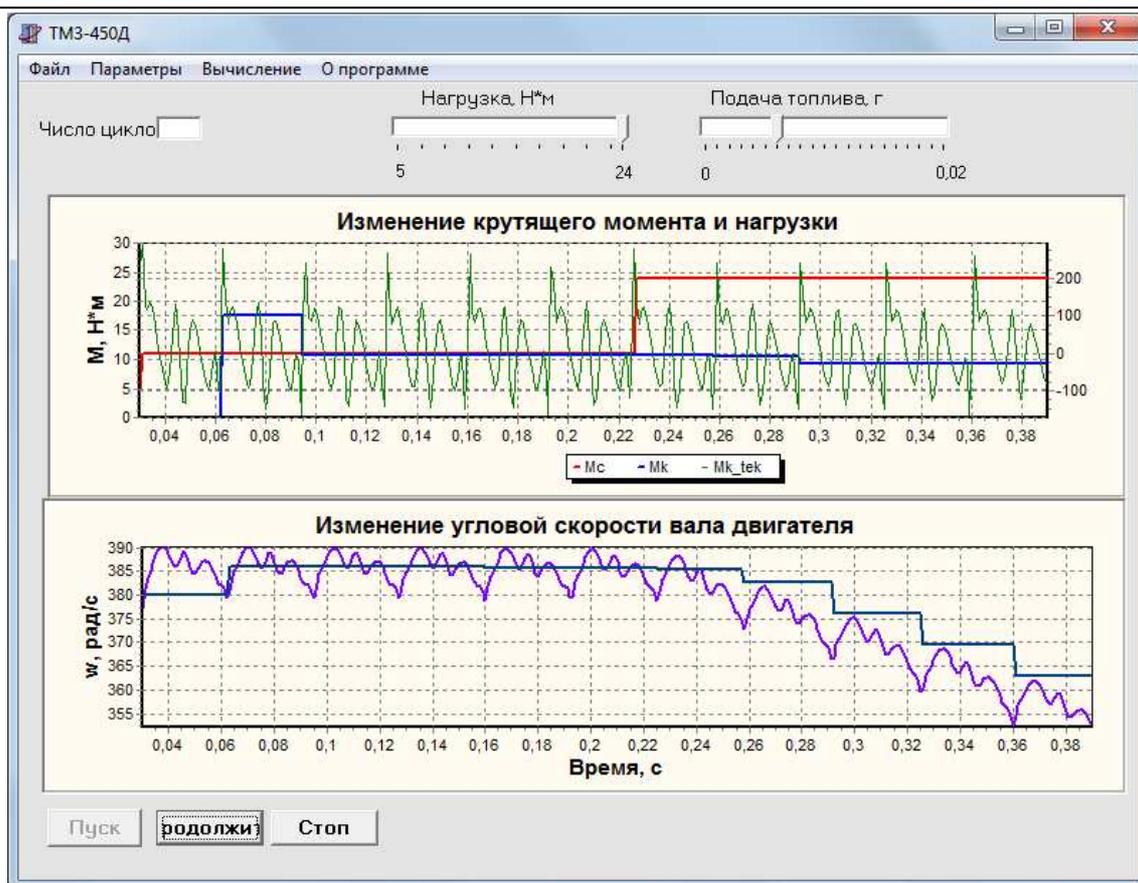


Рис. 2. Имитация переходного режима работы двигателя (ступенчатый наброс нагрузки)

На рис. 3 и 4 в виде статических и динамических характеристик [5, 6] приведены результаты расчета установившихся и переходных режимов работы дизеля ТМЗ-450Д.

Исследование нагрузочных характеристик (рис. 3) позволяет определить оптимальный нагрузочный режим работы двигателя, характеризующийся зоной минимальных расходов топлива, а также определить способы улучшения топливной экономичности двигателя.

Результаты, приведенные на рис. 3, позволяют сделать вывод об адекватности математической модели реальному объекту и возможности ее использования для проектировочных расчетов ДВС.

На рис. 4 представлены результаты вычислительного эксперимента по исследованию переходных режимов работы дизеля ТМЗ-450Д с всережимным регулятором частоты вращения двигателя. На режиме холостого хода имитировался ступенчатый наброс и сброс 100 % нагрузки. По результатам эксперимента определялись такие динамические характеристики, как время переходного процесса и наклон регуляторной ветви [6].

Кроме исследований и проектировочных расчетов ДВС, виртуальный стенд для снятия статических и динамических характеристик ДВС широко используется в учебном процессе кафедры «Автомобили и авто-

мобильное хозяйство» ТулГУ при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Силовые агрегаты автомобилей». На базе рассматриваемого стенда разработаны и выполняются следующие виртуальные лабораторные работы:

- снятие нагрузочной характеристики двигателя внутреннего сгорания;
- экспериментальное исследование неравномерности крутящего момента и хода двигателя.

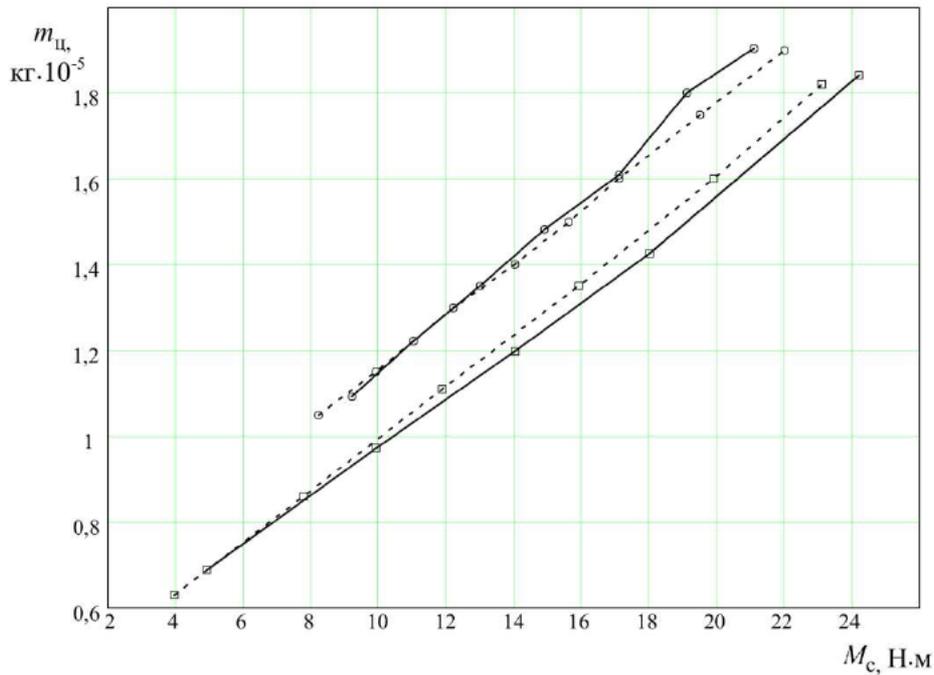


Рис. 3. Статические (нагрузочные) характеристики дизеля ТМЗ-450Д
 натуральный эксперимент: $\circ-\circ-\circ$ 3600 $\square-\square-\square$ 2000
 вычислительный эксперимент: $\circ-\circ-\circ$ 3600 $\square-\square-\square$ 2000

Таким образом, приведенные результаты иллюстрируют широкие возможности стенда как при проведении научных исследований, направленных на поиск новых и совершенствование существующих конструкций ДВС, так и в учебном процессе.

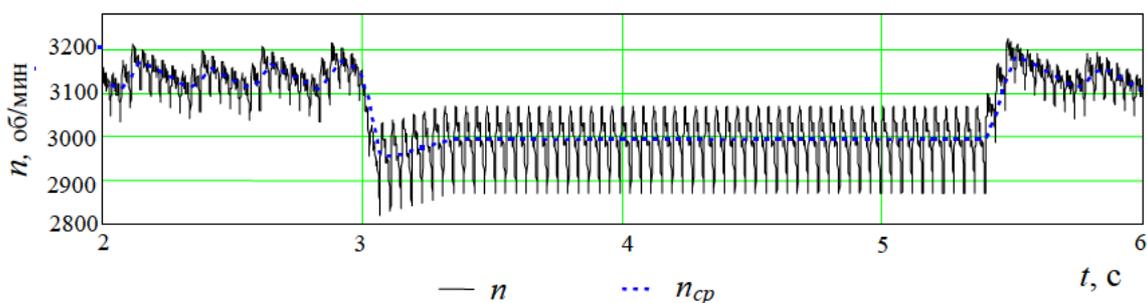


Рис. 4. Динамические характеристики дизеля ТМЗ-450Д

Разработанное математическое и программное обеспечение может дополняться по мере решения новых задач.

Список литературы

1. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Д.Н. Вырубов [и др.]. М.: Машиностроение, 1983. С. 322.
2. Патрахальцев Н.Н. Неустановившиеся режимы работы двигателей внутреннего сгорания: монография. М.: РУДН, 2009. С. 58-59.
3. Юлдашев А.К., Хайрутдинов И.И. Стенды для исследования двигателей при неустановившихся нагрузках. Казань: Изд-во «Фэн», 2002. С. 15 – 16.
4. Хмелев Р.Н. Математическое и программное обеспечение системного подхода к исследованию и расчету поршневых двигателей внутреннего сгорания: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 229.
5. Малиованов М.В., Хмелев Р.Н. О построении статических характеристик поршневых ДВС // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. Вып. 3. С. 166-170.
6. Малиованов М.В., Хмелев Р.Н. Разработка методики проектировочных расчетов поршневых двигателей внутреннего сгорания. // Материалы МНПК «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе». Т. 1. Пермь, ПНИПУ, 2012. С. 290-293.

Попов Иван Вячеславович, магистрант, iv3311@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Толмачев Павел Владимирович, магистрант, pvtolmachev@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Хмелев Роман Николаевич, д-р техн. наук, доц., aiah@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

THE VIRTUAL STAND FOR REMOVAL OF STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

I.V. Popov, P.V. Tolmachev, R.N. Khmelev

The article is devoted to the development of virtual stand for removal of static and dynamic characteristics of ICE of different kinds. The software of stand is founded on simulation dynamic model of ICE. The results of practical using stand for removal of static and dynamic characteristics of ICE are also presented.

Key words: internal combustion engine, static and dynamic characteristics, virtual stand.

Popov Ivan Vyacheslavovich, undergraduate, iv3311@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Tolmachev Pavel Vladimirovich, undergraduate, pvtolmachev@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Khmelev Roman Nikolaevich, doctor of technical sciences, docent, aiah@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 665.7.038

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ДЕПРЕССОРНО-ДИСПЕРГИРУЮЩИХ ПРИСАДОК ДЛЯ НИЗКОЗАСТЫВАЮЩИХ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ

В.Р. Гилязова, Н.Ф. Орловская, Е.В. Цыганкова

Проведен сравнительный анализ эффективности действия депрессорно-диспергирующих присадок производства зарубежных и российских фирм при концентрации в базовом дизельном топливе 150 г/т. Наилучшим образом, по данным авторов, зарекомендовала себя присадка Dodiflow 5817. Испытания не выявили отклонений низкотемпературных свойств базового дизельного топлива с присадкой Dodiflow 5817 от требований ГОСТ 32511-2013, седиментационная устойчивость по методике СТО 11605031-041-2010 была удовлетворительной.

Ключевые слова: депрессорно-диспергирующие присадки, седиментационная устойчивость, предельная температура фильтруемости.

Климатические условия РФ обуславливают большую потребность в высококачественных низкозастывающих дизельных топливах, которая (по данным А.П. Кинзуля и др.) обеспечивается менее чем наполовину.

Для дизельных топлив требуемые показатели низкотемпературных характеристик достигаются в результате снижения содержания высококипящих *n*-парафинов C_{18}^+ при оптимальном соотношении с *n*-парафинами C_{10} - C_{15} , углеводородами изостроения и моноциклическими аренами, которые являются растворителями высококипящих алканов [1].

На 19 из 30 крупных российских НПЗ для улучшения низкотемпературных свойств дизельных топлив «обрезают» конечные фракции летнего дизельного топлива (320...360 °С) с потерей 10 % потенциала, получая топливо с температурой застывания минус 35 °С или с потерей 20 % потенциала при «обрезании» фракции 280...360 °С для получения дизельного топлива с температурой застывания минус 45 °С [5].

Процессы карбамидной и цеолитной депарафинизации позволяют получать дизельные топлива с удовлетворительными низкотемпературными свойствами, но их выход снижается на 20...30 %. Добавление более легких фракций малоэффективно для снижения температуры помутнения, что объясняется слабой растворимостью высокоплавких *n*-парафинов.

Традиционно применяемые депрессорные присадки (полиметакрилаты, сополимеры винилацетата с этиленом и др.) снижают температуру застывания и предельную температуру фильтруемости дизельных топлив. Однако они не предотвращают их расслоения во время холодного хранения. Это связано с тем, что мелкодисперсные системы обладают большим избытком поверхностной энергии и в них самопроизвольно идут процессы укрупнения частиц. В результате укрупнения частиц парафинов происходит их седиментация, и топливо делится на два слоя: верхний, светлый и нижний, мутный, обогащенный парафинами. Оба слоя подвижны, но при отборе топлива из нижнего слоя двигатель работает с перебоями. Проблеме повышения седиментационной устойчивости дизельного топлива в процессе холодного хранения решают с помощью специальных добавок, диспергаторов парафинов. Эффект от их применения состоит в образовании очень мелких кристаллов парафинов и предотвращении их агрегации в течение длительного времени, что обуславливает большую седиментационную устойчивость образующейся дисперсии парафина в дизельном топливе.

Таким образом, современные топливные композиции должны содержать депрессорную присадку и диспергатор парафинов. Депрессорно-диспергирующие присадки призваны обеспечивать необходимый уровень седиментационной устойчивости дисперсии парафинов в дизельном топливе в условиях холодного хранения.

В 2014 г. в России вступил в действие ГОСТ Р55475 на депарафинированное зимнее и арктическое дизельное топливо, а с 2015 г. в странах Таможенного союза на производство зимнего дизельного топлива вводится ГОСТ 32511-2013. Топливо дизельное ЕВРО [2].

Депрессорные присадки вводят в зимние и арктические дизельные топлива, выпуск которых в РФ составляет около 13 млн т/год. Эти присадки вводят только в топлива, выработку которых невозможно осуществить путем подбора компонентного и фракционного состава; таких топлив около 4 млн т/год. При рабочих концентрациях депрессорных присадок 200...400 г/т потребность в них оценивается в 1200 т/год [3].

При производстве дизельных топлив в России в большинстве случаев используются зарубежные депрессорные присадки. ВЭС-410Д – одна из немногих отечественных присадок, сравнимых по эффективности с зарубежными образцами. Ее выпускает по технологии ВНИИ НП ОАО «Ангарский завод катализаторов и органического синтеза», однако к ней не подобран диспергатор парафинов [3].

Каждый НПЗ выпускает уникальное по составу дизельное топливо, к которому необходимо подбирать оптимальные депрессорную и диспергирующую присадки.

На ОАО «Ачинский НПЗ» в недавнем прошлом исследовались низкотемпературные свойства дизельного топлива с различной дозировкой присадок Dodiflow 5817, Dodiflow 5416, Dodiflow 4838, Dodiflow 5767, DodiflowLC 4301, Dodiflow 5380, Dodiflow 5603, Dodiflow 5747; Dodiwax 4500.

На основании экспериментальных данных был сделан вывод, что оптимальной депрессорно-диспергирующей присадкой является Dodiflow 5817 фирмы «Clariant» [1].

Для производства зимнего дизельного топлива на ОАО «Ачинский НПЗ» используется одноступенчатая двухстадийная схема гидродепарафинизации утяжеленной дизельной фракции ($t_{к.к.}$ – до 415 °С) с катализатором селективного гидрокрекинга HYDEX-G фирмы «SüdChemie» и гидроочистки с катализатором гидрообессеривания KF-757 производства «Albemarle» [1]. Состав базового дизельного топлива ЕВРО класс 2, % мас.: гидроочищенная фракция 162...308 °С $ct_{заст}$ = минус 40 °С (боковой погон К-301) – 25,1; гидроочищенная фракция 200...360 °С $ct_{заст}$ = минус 14 °С (куб К-301) – 61,4; прямогонная керосиновая фракция 146...223 °С $ct_{заст}$ = минус 52 °С – 4,9; прямогонная дизельная фракция 180...313 °С $ct_{заст}$ = минус 28 °С – 8,6. Предельная температура фильтруемости базового дизельного топлива (ПТФ) = минус 23 °С [1].

Авторы провели сравнительные испытания низкотемпературных свойств базового дизельного топлива ЕВРО класс 2 с вовлечением депрессорно-диспергирующих присадок производства разных фирм для выявления границ применимости присадок.

Испытуемое базовое дизельное топливо ЕВРО класс 2 имело следующие показатели качества (табл. 1).

Таблица 1

Показатели качества базового дизельного топлива

Наименование показателей	Базовое топливо ЕВРО класс 2	Норма по ГОСТ 32511-2013 класс 2
Плотность, кг/м ³ , при 15 °С	830...840	800...840
Фракционный состав, °С выход, % об., до 180 °С	3,0...4,0	Не более 10
выход, % об., до 340 °С	97,0...98,0	Не менее 95
Пределы выкипания, °С	350...360	-
Температура помутнения, °С	Минус 25...минус 26	Не выше минус 22
Предельная температура фильтруемости, °С	Минус 25...минус 45	Не выше минус 32

В базовое дизельное топливо вовлекались депрессорно-диспергирующие присадки производства различных фирм (табл. 2). Срок годности присадок 1 год. Концентрация присадок в смеси с топливом составляла 150 г/т как наиболее распространенная дозировка, обеспечивающая оптимальную предельную температуру фильтруемости.

Использовались исходные 20 %-ные растворы депрессорно-диспергирующих присадок в гидроочищенном керосине (растворитель).

На рис.1 представлены низкотемпературные свойства топлива при взаимодействии с депрессорно-диспергирующими присадками.

В данном случае все испытанные депрессорно-диспергирующие присадки обеспечивают топливу требуемые ГОСТ 32511-2013 для класса 2 показатели качества.

Для каждой пробы была оценена седиментационная устойчивость по методике СТО 11605031-041-2010 (метод ОАО «ВНИИ НП»), входящая в комплекс квалификационных методов оценки дизельных топлив с депрессорно-диспергирующими присадками [4].

Таблица 2

Испытуемые депрессорно-диспергирующие присадки

Обозначение образца топлива с испытываемой присадкой	Описание присадки
1	Dodiflow 5817 (Clariant), депрессорная присадка для средних дистиллятов в смеси с диспергатором парафинов, имеющая в своем составе смесь полимеров в высококипящих углеводородах
2	ВЭС-410Д (ОАО «АЗКиОС»), депрессорная присадка, представляющая 30 %-ный раствор полимерного продукта в нефтяной фракции
3	Keroflux 5682 (BASF), депрессорно-диспергирующая присадка, состоящая из полиэтиленового воска модифицированного, производного этилендиаминтетрауксусной кислоты (тетраамида) в растворителе 5...10 % мас., нафталина 3...5 % мас., сольвента нафты 25...40 % мас.
4	OFI 8863 (Innospec), раствор смеси органических сополимеров в ароматическом растворителе
5	АПДД (РФ), раствор смеси полимеров в высококипящих углеводородах
6	Проба сравнения – базовое топливо без присадки

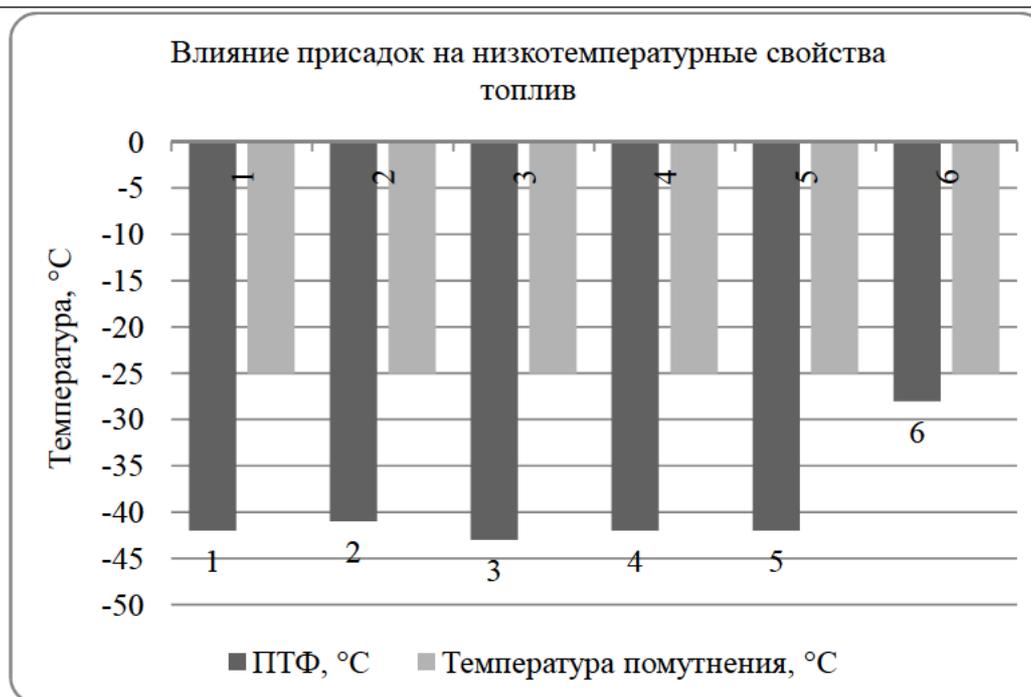


Рис. 1. Влияние присадок на низкотемпературные свойства топлив

Суть методики заключается в том, что образец топлива (500 мл) помещают в холодильную камеру с температурой на 5 °С ниже температуры помутнения и выдерживают в течение 16 часов. Затем отбирают верхние и нижние 20 % топлива, для которых определяют температуру помутнения и предельную температуру фильтруемости. При равномерном распределении кристаллов парафина по всему объему топлива температура помутнения и предельная температура фильтруемости отобранных проб будут отличаться от характеристик исходного топлива не более чем на 1... 2 °С. Если эти показатели отличаются более чем на 2 °С, топливо считается нестабильным [4].

Все образцы выдержали испытания по данной методике, предельная температура фильтруемости 20 % верхней фазы и 20 % нижней фазы не отличались более чем на 2 °С.

Отдельно были исследованы присадки фирмы «Петро-Хэуа» (КНР), которые понижают предельную температуру фильтруемости до требуемых «не выше минус 32 °С», но не выдерживают испытания на седиментационную устойчивость. По истечении 16 ч при нахождении топлива ниже температуры помутнения кристаллы парафинов были распределены в топливе неравномерно, в нижнем слое образовался осадок парафинов белого цвета.

Проведенные через 2 месяца проверочные испытания для всех образцов дали следующие результаты (рис. 2). Образцы 1, 2, 4 обеспечили топливу требуемые ГОСТ 32511-2013 для класса 2 показатели качества.

Присадки 3 и 5 не обеспечили требуемые показатели качества через 2 месяца холодного хранения после их поступления.

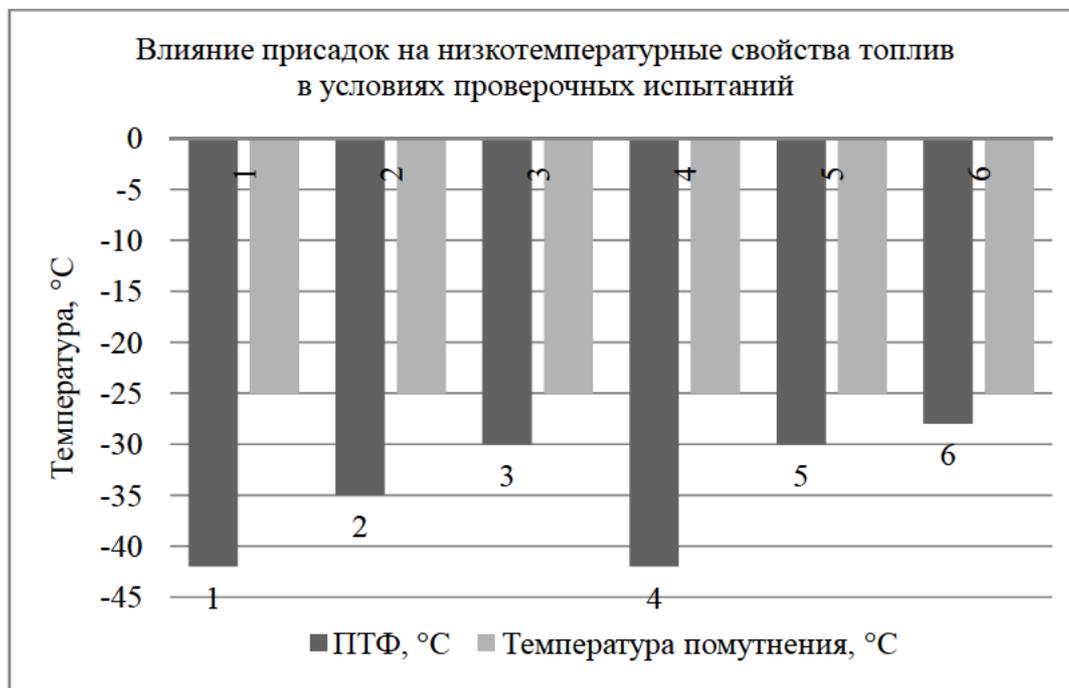


Рис. 2. Влияние присадок на низкотемпературные свойства топлив в условиях проверочных испытаний

Таблица 3

Сравнительный анализ эффективности действия депрессорно-диспергирующих присадок

Депрессорно-диспергирующие присадки	Первичные испытания		Проверочные испытания	
	Соответствие низкотемпературных свойств требованиям ГОСТ 32511-2013	Седиментационная устойчивость по СТО 11605031-041-2010	Соответствие низкотемпературных свойств требованиям ГОСТ32511-2013	Седиментационная устойчивость по СТО 11605031-041-2010
1 Dodiflow 5817, Clariant	+	+	+	+
2 ВЭС-410Д, ОАО «АЗ-КиОС»	+	+	-	-
3 Keroflux 5682, BASF	+	+	+	-
4 OFI 8863, Innospec	+	+	+	-
5 АПДД, РФ	+	+	-	-

Для каждого образца была также проверена седиментационная устойчивость по методике ВНИИНП.

Образец 1: выдержал все испытания.

Образец 2: топливо нестабильно, через 16 часов расслоилось, осадок 10 мм.

Образец 4: топливо нестабильно, предельная температура фильтруемости нижней и верхней фазы отличались более чем на 2 °С от исходной.

При хранении все депрессорно-диспергирующие присадки расслоились, однако после нагревания до температуры 50 °С снова стали однородными.

В результате исследований установлено следующее.

1. Проведен сравнительный анализ эффективности действия депрессорно-диспергирующих присадок производства зарубежных и российских фирм при концентрации в топливе 150 г/т (табл. 3).

2. Первичные испытания не выявили отклонений низкотемпературных свойств базового топлива с присадками от требований ГОСТ 32511-2013, седиментационная устойчивость по методике СТО 11605031-041-2010 удовлетворительная.

3. Проверочные испытания с теми же присадками, проведенные через 2 месяца (при холодном хранении присадок), показали превышение предельной температуры фильтруемости по сравнению с нормой для присадок Keroflux 5682 (BASF) и АПДД (РФ).

Топлива с присадками ВЭС-410Д (ОАО «АЗКиОС») и OFI 8863 (Innospec) не выдержали испытания на седиментационную устойчивость.

4. Наилучшим образом, по данным авторов зарекомендовала себя присадка Dodiflow 5817.

Надо отметить, что компания «Clariant» – основной поставщик депрессорных присадок, она присутствует на российском рынке депрессоров с 1997 г. Предыдущие исследователи [1] также отмечали эффективность использования Dodiflow 5817 для производства зимнего дизельного топлива на ОАО «Ачинский НПЗ», предлагалась дозировка 300 ppm (300 г/т). Депрессорно-диспергирующие присадки не универсальны, к каждому дизельному топливу подбирают оптимальную. Это объясняется необходимостью соответствия размеров и геометрии молекул полимера присадки размерам средней молекулы парафинов топлива.

Таким образом, можно сделать вывод, что устойчивый результат достигается при введении в базовое топливо 150 г/т Dodiflow 5817.

Список литературы

1. Совершенствование технологии производства низкозастывающих дизельных топлив / А.П. Кинзуль [и др.] // Мир нефтепродуктов. 2012. № 8. С. 7 – 11.

2. Камешков А.В., Гайле А.А. Требования к низкотемпературным свойствам зимнего и арктического дизельных топлив в России и объем их производства // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (Технического университета) . 2015 . №29 (55). С. 49-60.

3. Данилов А.М., Безгина А.М., Окнина Н.Г. Развитие работ в области присадок к топливам в России // Мир нефтепродуктов. 2014. № 6. С. 31-33.

4. СТО 11605031-041-2010. Дизельное топливо с депрессорными присадками. Метод квалификационной оценки седиментационной устойчивости при отрицательных температурах. М.: ОАО «ВНИИ НП», 2010.

Гилязова Василя Ринатовна, асп., togsming@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа,

Орловская Нина Федоровна, д-р техн. наук, проф., togsming@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа,

Цыганкова Елена Владимировна, ст. преподаватель, togsming@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа,

**THE EFFECTIVENESS OF THE ACTION OF DEPRESSOR-DISPERSANT
ADDITIVES FOR WAXY DIESEL FUELS**

V.R. Gilyazova, N.F. Orlovskaya, E.V. Tsigankova

Comparative analysis of efficiency of depressor-dispersant additives for diesel fuel was carried out. According to our data, “Dodiflow 5817” additive was the best. The tests showed no abnormalities of the low temperature properties of fuel with the addition of “5817 Dodiflow” (150 g/t) from the requirements of normative documents. Sedimentation stability of this fuel was satisfactory

Key words: depressor-dispersant additives, sedimentation stability, cold filter plugging.

Gilyazova Vasilya Rinatovna, postgraduate, togsming@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas,

Orlovskaya Nina Fedorovna, doctor of technical sciences, professor, togsming@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas,

Tsigankova Elena Vladimirovna, senior lecturer, togsming@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas

УДК 621.398

БУРОВОЙ СНАРЯД НА ГРУЗОНЕСУЩЕМ КАБЕЛЕ С БЕЗДАТЧИКОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ АВТОРЕЗОНАНСНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ВОЗВРАТНО-ВРАЩАТЕЛЬНОВОГО ДВИЖЕНИЯ

Э.А. Загривный, Д.А. Поддубный

Представлены конструктивная и расчетная схемы динамически уравновешенного бурового снаряда на грузонесущем кабеле с электроприводом возвратно-вращательного движения. Записано выражение электромагнитного момента погружного вентильного электродвигателя. Показана функциональная схема электропривода возвратно – вращательного движения. Показана схема включения обмоток погружного вентильного электродвигателя. Сформулирован закон управления авторезонансными колебаниями и показан датчик скорости возвратно-вращательного движения для реализации авторезонансных колебаний возвратно-вращательного движения буровой коронки. Представлен электротехнический комплекс на основе динамически уравновешенного бурового снаряда. Описаны недостатки системы управления с использованием датчика скорости и представлен алгоритм бездатчиковой системы управления.

Ключевые слова: электромеханическая система, авторезонанс, буровой снаряд, грузонесущий кабель, колебания, электротехнический комплекс, бездатчиковая система управления.

Электромеханические колонковые буровые снаряды на грузонесущем кабеле в составе буровых комплексов применяются при бурении ледников в Антарктиде, Арктике, Гренландии и др. Достоинствами этих комплексов являются высокая мобильность, низкая металлоёмкость, отсутствие бурильных колонн. Использование подобного электромеханического бурового снаряда на грузонесущем кабеле, разработанного в Горном университете и запатентованного в РФ, позволило получить наивысшие мировые результаты при бурении в Антарктиде на станции «Восток» при вскрытии подледникового озера Восток 5 февраля 2012 года – 3769,3 метра.

В отличие от традиционных буровых снарядов разрабатываемые в Горном университете и запатентованные в РФ динамически уравновешенные буровые снаряды (ДУБС) [3,5,6,7] не требуют применения редуктора и распорных устройств. Они могут применяться для взятия донных проб рек, озёр, морей и океанов, подледникового озера Восток в Антарктиде, многорейсового бурения в шельфовых зонах с бортов неспециализированных судов, вскрытия продуктивных пластов, очистки призабойных зон нефтяных и газовых скважин, а также скважин на пресные и минеральные воды (рис. 1).

В настоящее время продолжаются работы по созданию ДУБС на базе вентильного двигателя. Буровой снаряд представляет собой двухмассовую колебательную электромеханическую систему (ЭМС) с двумя степе-

нями свободы возвратно-вращательного движения с вентильным электроприводом [2,3,5,6,7]. Статорная часть 3 погружного маслозаполненного электродвигателя соединена с роторной частью (8,9,10) упругим элементом 4 (параллельно соединенными пружинами кручения). Под действием электромагнитного момента $M_{ЭМ}$ статорная часть с моментом инерции J_1 перемещается на угол φ_1 в неподвижной системе координат. Роторная часть с моментом инерции J_2 под действием того же электромагнитного момента $M_{ЭМ}$ поворачивается на угол φ_2 в противоположном направлении. Возвратно-вращательное движение статорной части относительно роторной происходит относительно неподвижного узлового сечения $A-A$ упругого элемента, расположение которого зависит от соотношения моментов инерции и нагрузок на статорную и роторную части ДУБС.

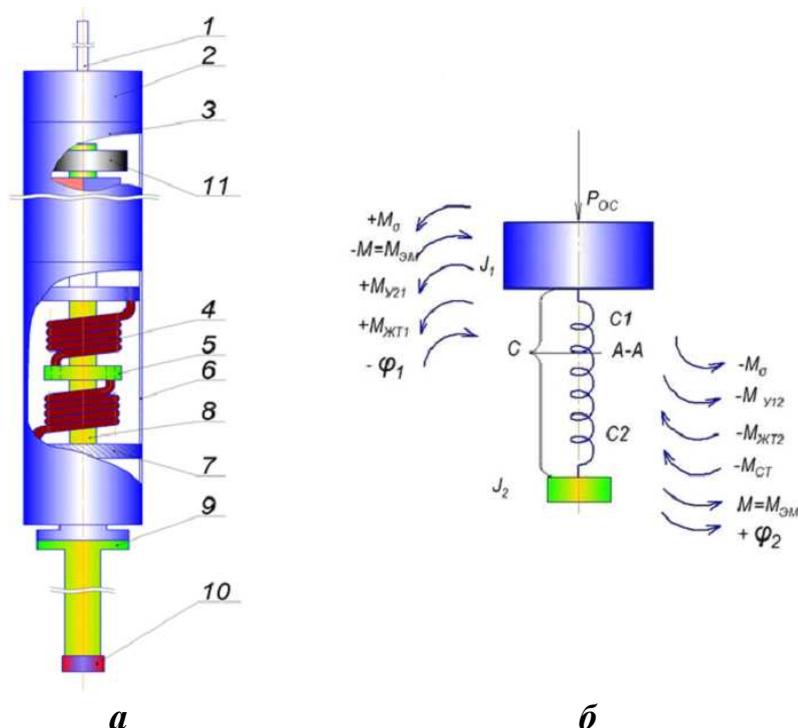


Рис. 1. Конструктивная (а) и расчётная (б) схемы динамически уравновешенного бурового снаряда для бурения донных пород по патенту РФ на полезную модель №95728:

- 1 – грузонесущий кабель; 2 – кабельный замок; 3 – статор вентильного электродвигателя (ЭД); 4 – упругий элемент (пружина кручения); 5 – крепеж пружины кручения; 7 – корпус ЭД; 8 – вал ротора ЭД; 9 – колонковая труба; 10 – буровая коронка; 11 – бесконтактный датчик скорости ВВД**

Со стороны упругого элемента, представленного пружиной кручения с жесткостью C , на статорную J_1 и роторную J_2 части действуют упругие моменты $M_{y_{12}}=M_{y_{21}}$, определяемые углом закручивания пружины кру-

чения и коэффициентом жёсткости. Со стороны буровой коронки и колонковой трубы на роторную часть с моментом инерции J_2 и на статорную часть ДУБС с моментом инерции J_1 действуют момент сопротивления M_c в виде аддитивной комбинации вязкого и сухого трений, а также случайной составляющей момента нагрузки M_σ . При постановке снаряда на забой и подаче на статорные обмотки электродвигателя напряжения, формирующего в зазоре между ротором и статором знакопеременный электромагнитный момент, статорная и роторная части совершают возвратно-вращательные движения в противоположных направлениях. При работе на резонансной частоте электромеханической системы амплитуды колебаний имеют максимальные значения, а сумма моментов вращения, действующая на эти части, равна нулю, т.е. буровой снаряд является динамически уравновешенным. Давление на забой и момент сопротивления на буровой коронке определяется общей массой снаряда.

При работе ДУБС на резонансной частоте электромеханической системы амплитуды колебаний имеют максимальные значения, а сумма моментов вращения, действующих на эти части, равна нулю, то есть буровой снаряд является динамически уравновешенным.

Для построения математической модели электромеханической системы целесообразно воспользоваться уравнениями Лагранжа второго рода, где за обобщенные координаты принимаются углы поворота статорной φ_1 и роторной φ_2 частей

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 + \eta_1 \cdot \dot{\varphi}_1 + k_2 \varphi_1 - k_2 \varphi_2 = M_1 \\ \ddot{\varphi}_2 + \eta_2 \cdot \dot{\varphi}_2 + k_1 \varphi_2 - k_1 \varphi_1 = M_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где $\eta_1 = \frac{\mu_1}{J_1}$; $\eta_2 = \frac{\mu_2}{J_2}$; $M_1 = \frac{M}{J_1}$; $M_2 = -\frac{M}{J_2}$; $k_1 = \omega_0^2 \frac{J_1}{J_1 + J_2}$;

$k_2 = \omega_0^2 \frac{J_2}{J_1 + J_2}$; μ_1, μ_2 – коэффициенты эквивалентного вязкого трения на

статорной и роторной частях; ω_0 – собственная частота электромеханической системы.

Уравнения (1) позволяют проводить анализ нормальных режимов (нагрузка сосредоточена на буровой коронке, а на статорной части не превышает 5...10 %), аномальных и аварийных режимов работы ДУБС (работа в вязкой среде, заклинивание статорной или роторной частей бурового снаряда), а также исследовать симметричные и несимметричные режимы работы [5,6].

Полученная система имеет одну собственную частоту ω_0 и две парциальные частоты λ_1 (при заклинивании роторной части) и λ_2 (при заклинивании статорной части) колебательных систем с одной степенью свободы, из которых состоит исходная система. При этом $\lambda_1 < \omega_0 < \lambda_2$.

Теоретический угол размаха колебаний буровой коронки относительно неподвижных осей, связанных с Землей, определяется выражением

$$\varphi_K = \varphi_{\Pi} \frac{J_1}{J_1 + J_2}, \quad (2)$$

где $\varphi_{\Pi} = 60, 120, \text{ и } 180$ – теоретически допустимый угол поворота ротора (размах колебаний) относительно статора, град; (далее рассматривается случай для $\varphi_{\Pi} = 180$ эл. градусов). В реальных конструкциях $J_1 = (5 \div 10)J_2$. Так, например, при $J_1 = 5J_2$ угол поворота (размах колебаний) буровой коронки

$$\varphi_K = 180 \frac{1}{1 + \frac{1}{5}} = 150 \text{ эл. град.} \quad (3)$$

Известно, что амплитуды колебаний в резонансных машинах и устройствах в режимах холостого хода и малых нагрузок достигают значительных величин, вызывая в силовых системах этих устройств недопустимо высокие разрушающие механические напряжения. По этой причине такие машины работают в неэффективных зарезонансных областях. Поэтому электропривод при возвратно-вращательных движениях (ВВД) в режимах авторезонансных колебаний должен при превышении заданного угла колебаний переходить в тормозной режим, обеспечивая работу на холостом ходу с заданным размахом колебаний.

Также в режимах авторезонансных колебаний электропривод ВВД должен быть не чувствителен к изменениям динамических параметров (коэффициента жёсткости c упругого элемента, моментов инерции J), к величине и характеру нагрузки. Таким достаточно жёстким требованиям в полной мере удовлетворяет нетрадиционный электропривод с вентильным электродвигателем, в котором используется трёхфазный статор общепромышленного трёхфазного асинхронного электродвигателя с магнитным ротором, имеющим одну или две пары полюсов. Электромагнитный момент этого электродвигателя удобно представить в виде

$$M_{\text{ЭМ}} \equiv K |\overline{\psi}_C \times \overline{\psi}_R| \equiv K \cdot |\overline{\psi}_C| \cdot |\overline{\psi}_R| \cdot \sin \varphi, \quad (4)$$

где K – коэффициент пропорциональности; $\overline{\psi}_S$ – потокосцепление статора, $\overline{\psi}_R$ – потокосцепление ротора; φ – угол между потокосцеплением статора и ротора.

Учитывая, что $\psi_S = kI$, $\psi_R = \text{const}$, для статической характеристики электромагнитного момента погружного вентильного двигателя можно записать

$$M_{\text{ЭМ}} = k_M I \overline{\psi}_R = k_M \psi \cdot I \cdot \sin \varphi. \quad (5)$$

В зависимости от схемы соединения статорных обмоток электродвигателя можно получить различную амплитуду колебаний. Фазные обмотки электродвигателя “А – Х”, “В – Y” и “С – Z” с одной парой полю-

сов, соединённые, как показано на рис. 2, при питании от управляемого однофазного автономного инвертора тока позволяют получить возвратно-вращательные движения ротора с предельным теоретическим размахом 180 геометрических градусов. При снижении технологической нагрузки амплитуда колебаний не превышает 90 градусов из-за перехода ротора в тормозную зону.

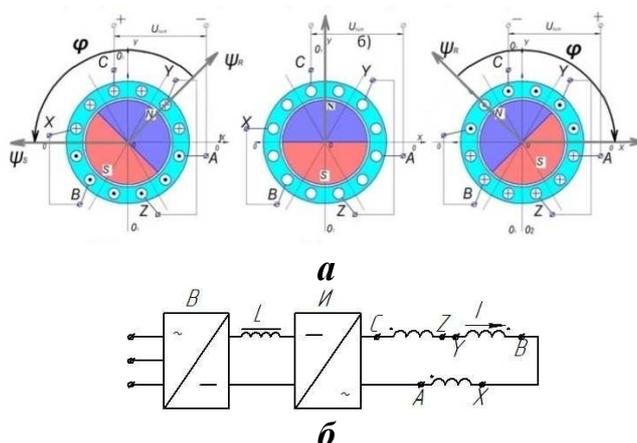


Рис. 2. Схемы потокосцеплений ротора и статора (а) при начальной установке ротора (II) и различных направлениях токов в обмотках статора (I), (III); схема соединений выпрямителя В, однофазного инвертора тока И и обмоток статора авторезонансного вентильного электропривода возвратно-вращательного движения (б)

Для управления авторезонансными колебаниями разработан и запатентован «Способ возбуждения и регулирования авторезонансных колебаний в электроприводе возвратно-вращательного движения» [1, 2], согласно которому для возбуждения авторезонансных колебаний в электроприводе возвратно-вращательного движения на каждом полупериоде колебаний в моменты времени перехода кривой скорости колебаний ротора относительно статора через нулевое значение на обмотки электродвигателя подают напряжение, формирующее электромагнитный момент, изменяющийся синфазно со скоростью колебаний ротора относительно статора.

При таком способе управления электроприводом возвратно-вращательного движения возможно получать авторезонансные колебания ЭМС ДУБС, инвариантные к изменениям и нелинейностям динамических параметров системы и нагрузок на буровой коронке, т.к. во всех режимах на каждом полупериоде имеются точки $\varphi' = 0$. Для реализации способа управления резонансными колебаниями используется датчик скорости ВВД [1], разработанный в Горном университете (рис.3, а). Ротор датчика скорости устанавливается на валу электродвигателя с совмещением продольных осей симметрий магнитных полей роторов датчика и электродвигателя.

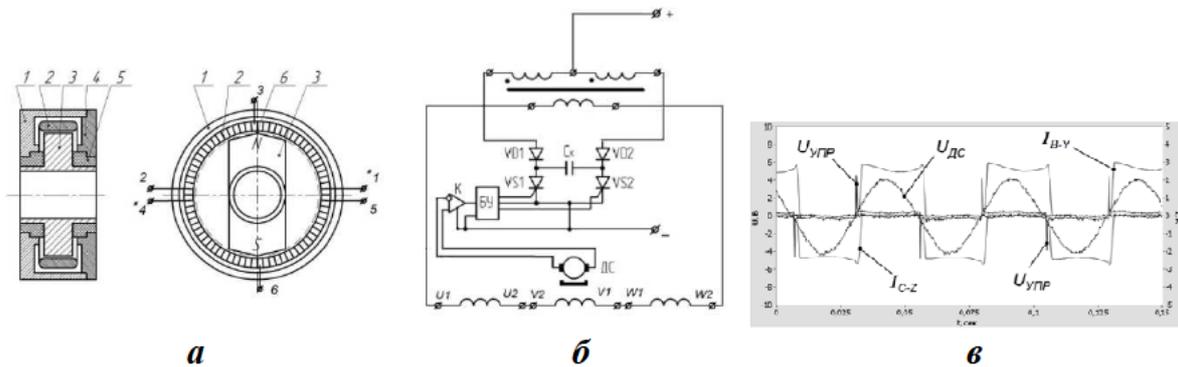


Рис. 3. Бесконтактный датчик скорости ВВД: а – схема управления авторезонансными колебаниями электропривода ВВД; б – ДС-датчик скорости; К – компаратор; БУ – блок управления; VS1 и VS2 – силовые тиристоры; VD1 и VD2 – силовые диоды; Cк – коммутационная емкость; “А-Х” “С-З”, “В-У” – рабочие обмотки; в – авторезонансный режим

При подаче напряжения с датчика напряжения ДС на вход компаратора К в точках $\varphi' = 0$ (в нулевой скорости ротора) на выходе компаратора формируется управляющий импульс для силовых тиристоров (рис. 3, б, в).

Главная особенность замкнутой схемы управления (с использованием датчика скорости) заключается в обеспечении устойчивой работы в авторезонансном режиме при изменении динамических параметров и нагрузок на буровой коронке: при увеличении или уменьшении нагрузки уменьшается или увеличивается частота при сохранении резонансных фазовых соотношений между моментом ЭД – во всех режимах угол сдвига между положением и скоростью колеблющихся масс составляет 90 градусов.

На основе всего вышеизложенного разработан электротехнический комплекс для бурения ледника (рис. 4). Он может также использоваться для взятия донных проб со дна водоёмов и для отчистки призабойных зон нефтяных и газовых скважин от песка и асфальтосмолопарафиновых отложений. В качестве приводного двигателя ДУБС предлагается использовать погружной вентильный электродвигатель ВД16117В5. Его технические характеристики при номинальной частоте вращения 3000 об/мин: мощность 16 кВт, напряжение 750 В, номинальный ток 15 А, ток холостого хода 1 А. При принятой резонансной частоте колебаний ротора 25 Гц линейное напряжение электродвигателя должно быть снижено до 375 В, а фазное – до 217 В. Тогда напряжение питания электродвигателя при последовательном соединении обмоток статора составит 650, суммарное сопротивление токопроводящих жил, питающего электродвигатель, $R_{общ} = 25$ Ом, потери напряжения при номинальном токе в погружной кабельной линии составят 375 В. Напряжение питания электродвигателя при

последовательном соединении обмоток статора 650 В, номинальное вторичное напряжение трансформатора инвертора тока с учётом потерь в погрузной линии 1025 В.

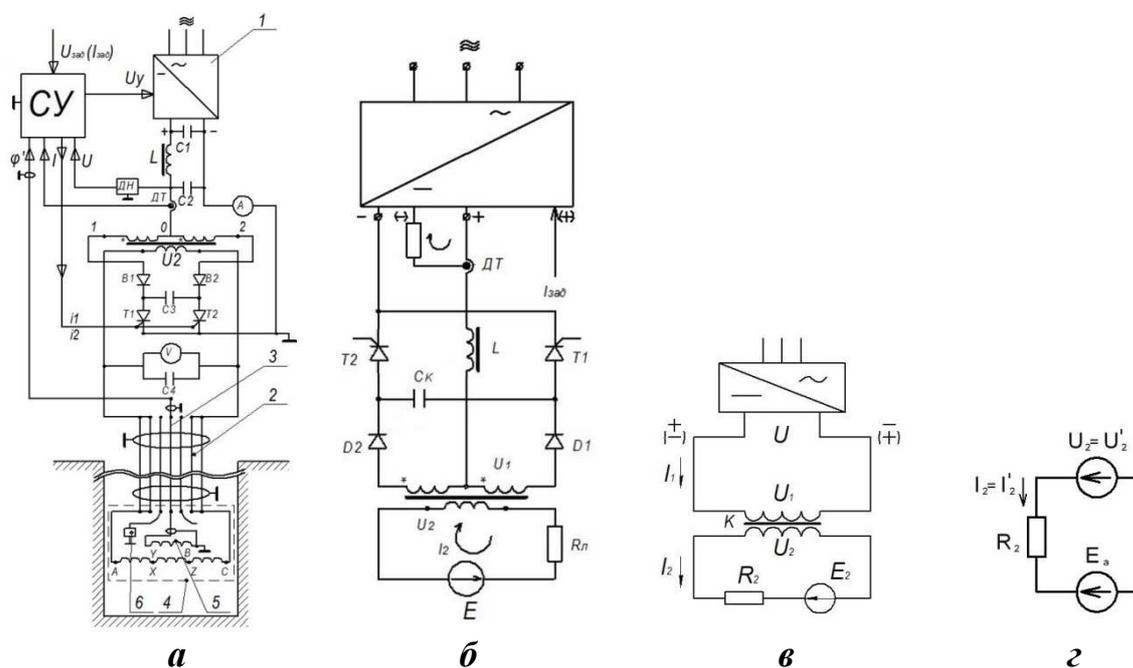


Рис. 4. Функциональная (а), расчётная (б), идеализированная (в) и приведенная (г) схемы электротехнического бурового комплекса: 1 – управляемый преобразователь переменного тока в постоянный и инвертор тока; 2 – грузонесущий кабель; 3 – центральная экранированная жила грузонесущего кабеля; 4 – ДУБС; 5 – датчик скорости и положения ротора; б – датчик забоя; СУ – система управления; ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения; L – дроссель

В качестве преобразователя переменного тока в постоянный и тока инвертора (рис. 4) предполагается применение преобразователя серии TPD32 EV-500-2B компании GEFTRAN с параметрами: номинальный выходной ток 40 А; входное линейное напряжение переменного тока 230...500 В; частота питающей сети 50/60 Гц; выходное напряжение постоянного подаётся по грузонесущему кабелю КГ1х1,5+6х2,5-125-200. Недостатком этого комплекса являются наличие в буровом снаряде датчика скорости и применение для его использования экранированной токоведущей жилы грузонесущего кабеля (рис. 4, а).

Использование бездатчиковой системы управления по наблюдаемым параметрам позволит избавиться от указанного недостатка, а также позволит повысить надёжность и эффективность колебательного электропривода бурового снаряда (рис. 5). Наблюдаемыми параметрами будут ток и напряжение во вторичной обмотке трансформатора Т, значение которых снимается датчиками тока ДТ и напряжения DV соответственно (рис. 6).

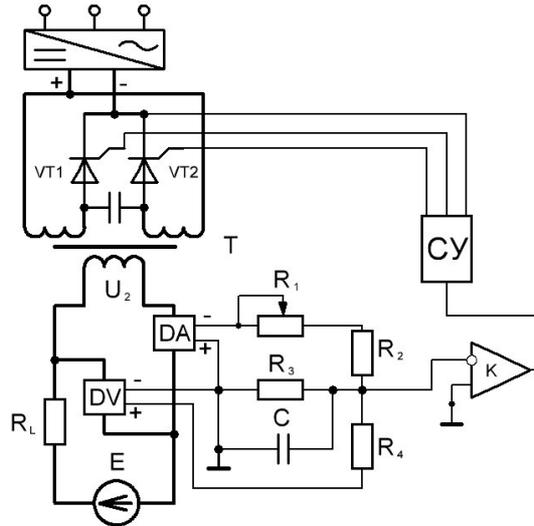


Рис. 5. Бездатчиковая система управления авторезонансными колебаниями ротора вентильного электропривода динамически уравновешенного бурового снаряда

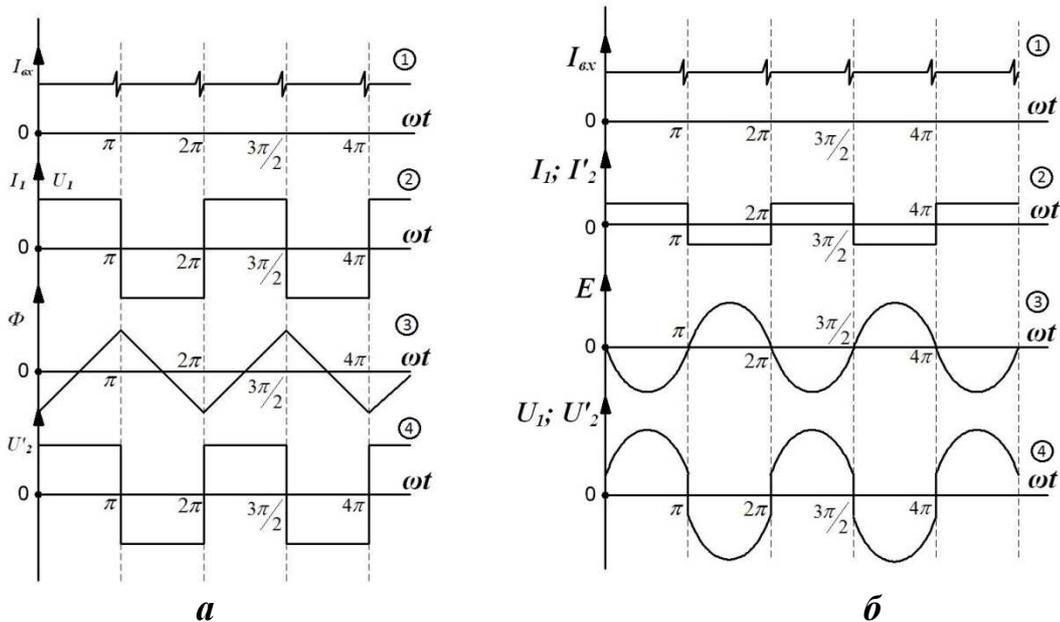


Рис. 6. Формы токов и напряжений при работе инвертора тока (а – на активную нагрузку: 1 – входной ток; 2 – первичные ток и напряжение; 3 – магнитный поток; 4 – приведенное вторичное напряжение; б – на активную нагрузку с противоЭДС: 1 – входной ток; 2 – токи первичный и вторичный; 3 – противоЭДС; 4 – напряжение первичное и вторичное

Настройка системы управления выполняется при неподвижном (заклиненном) роторе и заданном во вторичной цепи постоянном (номинальном) токе установлением на потенциометре R_1 значения, при котором на-

пряжение на входе компаратора К будет равно нулю. При движении ротора это напряжение будет меняться, а компаратор будет выдавать управляющие импульсы, когда оно равно нулю. Такое состояние напряжений и токов наступает только при останове ротора в точках, в которых происходит переключение тиристорov VT1 и VT2 и изменение знака электромагнитного момента, т.е. выполняются условия резонансных соотношений независимо от технологической нагрузки и нелинейностей динамических параметров системы.

Работоспособность этой бездатчиковой системы управления авторезонансными колебаниями проверена на математической имитационной модели и физическом лабораторном макете.

Список литературы

1. Пат. 2488122 РФ. МПК G 01P №3/48. Бесконтактный датчик скорости вращения и положения ротора / Э.А. Загривный, А.Н. Фоменко, В.А. Иванник, Ю.А. Гаврилов, Н.С. Губарь. Опубл. 20.07.2013. Бюл. № 20. 8 с.

2. Пат. 2410826 РФ. МПК H 02P №27/02. Способ возбуждения и регулирования авторезонансных колебаний в электроприводе возвратно-вращательного движения / Э.А. Загривный, Ю.А. Гаврилов. Опубл. 27.10.2008. Бюл. № 30. 7 с.

3. Пат. 2337225 РФ. МПК H 02K №17/12. Электромеханический колонковый буровой снаряд / Э.А. Загривный, В.В. Рудаков, С.С. Стародед, Ю.А. Гаврилов. Опубл. 27.01.2011. Бюл. № 3. 10 с.

4. Пат. 2401503 РФ. МПК H 02P №25/02. Электропривод колебательного движения / Э.А. Загривный, С.С. Стародед, Ю.А. Гаврилов. Опубл. 10.10.2010. Бюл. № 28. 15 с.

5. Загривный Э.А., Губарь Н.С., Поддубный Д.А. Бесконтактный датчик скорости возвратно – вращательных движений ротора и области его применения // «Современные проблемы науки и образования» г. Саратов, 2013. №3. [Электронный ресурс] URL <http://www.science-education.ru/109-9159>. (дата обращения: 10.02.2016).

6. Загривный Э.А., Поддубный Д.А. Электротехнический комплекс на основе динамически уравновешенного бурового снаряда на грузонесущем кабеле. // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин». Томск, 2014. С. 45 – 54.

7. Губарь Н.С. Электротехнический комплекс на основе динамически уравновешенного бурового снаряда на грузонесущем кабеле для бурения донных пород подледниковых водоемов: автореф. дис.... канд. техн. наук СПб., 2013. 22 с.

Загривный Эдуард Анатольевич, д-р техн. наук, проф., zagrivniy@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,

Поддубный Дмитрий Александрович, асп., poddubniy.da@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

DRILL AT A CARRYING CABLE WITH SENSERLESS CONTROL OF ELECTRIC DRIVE WITH AUTO-RESONANT SWINGING MOVEMENT

E.A. Zagrivniy, D.A. Poddubniy

The article presents the structural and design diagrams of dynamically balanced drill on the carrying cable with electric drive of reciprocating rotary motion. Equation of electromagnetic torque of the submersible motor valve was shown. Functional diagram of the electric drive of reciprocating rotary motion was presented. Connection layout of submersible motor windings was introduced. Control law of autoresonant oscillations was stated. Electrical system based on dynamically balanced drill was proposed. Disadvantages of the speed sensor based control system were described. Algorithm of sensorless control was demonstrated.

Key words: electromechanical system, autoresonant system, drill, carrying cable, oscillations, sensorless control system.

Zagrivniy Eduard Anatolevich, doctor of technical sciences, professor, zagrivniy@yandex.ru, Russia, St-Petersburg, National Mineral-resources University «Mining», St-Petersburg,

Poddubniy Dmitriy Aleksandrivich, postgraduate, poddubniy.da@yandex.ru, Russia, St-Petersburg, National Mineral-resources University «Mining», St-Petersburg

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ АЛМАЗНОМ СВЕРЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.С. Дударев, В.И. Свирщёв

Приводится рассмотрение важной теплофизической задачи определения температуры в зоне резания, возникающей при сверлении полимерных композиционных материалов, на примере углепластика. Полимерные композиционные материалы имеют особенности при механической обработке, характеризуются анизотропными физико-механическими и теплофизическими свойствами, низкой теплопроводностью. Известные подходы для определения температурного поля при обработке металлов непригодны. Предложено аналитическое решение нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности. Полимерный композиционный материал представлен как двухкомпонентная система.

Ключевые слова: алмаз, сверление, полимерные композиционные материалы, температура, теплопроводность, температурное поле.

Проведение теплофизического анализа с целью управления тепловыми процессами в технологических системах является одним из резервов повышения качества изделий [1].

Температурное поле элементов технологической системы «Станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ) формируется возникающими в ней источниками теплоты.

Существуют различные подходы к определению температурного поля в компонентах технологической системы, основанные на решении дифференциального уравнения теплопроводности [1], среди которых интерес представляют аналитические и численные методы решения краевых задач [2, 3, 4].

Задача определения температурного поля при шлифовании рассмотрена в большом количестве работ, однако до настоящего времени остаётся ряд нерешённых вопросов, к числу которых относится влияние смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) на формирование температурного поля и физико-механического состояния поверхностного слоя.

Обработка резанием полимерных композиционных материалов (ПКМ) сопровождается целым рядом специфических особенностей, определяемых, главным образом, структурным строением ПКМ, а также их физико-механическими свойствами [5].

По физической природе алмазное сверление ПКМ соответствует физической модели шлифования, но специфика свойств обрабатываемых ПКМ определяет исключительные тепловые явления. Так, низкая теплопроводность ПКМ кардинально влияет на соотношение составляющих те-

плового баланса. Тепло, выделяемое в процессе резания, концентрируется на контактных поверхностях заготовки и инструмента. Согласно исследованию, приведённому в работе [6], тепло, выделяемое в процессе резания ПКМ (углепластика УГЭТ) и стали 40Х, распределяется между элементами технологической системы согласно гистограммам, приведенных на рис. 1.

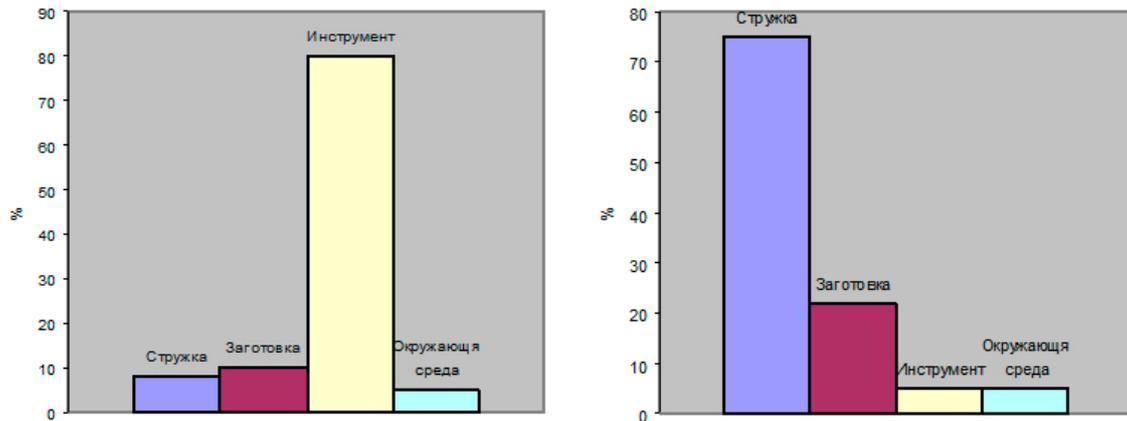


Рис. 1. Распределение и отвод тепла при резании лезвийным инструментом (точение): а – резание (точение) углепластика; б – резание (точение) стали 40Х

Аналитический расчет температуры резания, а особенно распределения температур по поверхности и в глубину изделия, представляет большие трудности по той причине, что ПКМ имеют ярко выраженную анизотропию не только механических, но и теплофизических свойств [7], которые зависят от направления теплового потока относительно направления ориентации волокон (рис. 2). Теплопроводность в направлении оси Z по рис. 2 существенно превышает теплопроводность слоя ПКМ в других направлениях (оси X и Y).

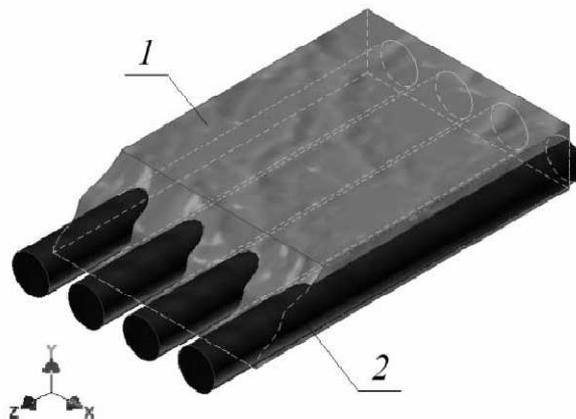


Рис. 2. Схема монослоя ПКМ: 1 – полимерная матрица (связующее); 2 – волокна армирующие (наполнитель)

Наиболее часто для прогнозирования двумерного температурного поля используется решение дифференциального уравнения теплопроводности для подвижного полосового источника [1]. Однако уравнение из [1] не учитывает охлаждающего влияния СОТС на характер изменения температурного поля. Попытка учесть это влияние, предпринятая, например В.А. Сипайловым [2] и А.Н. Паршаковым [3], позволила получить только приближенное решение, основанное на ряде допущений. Сложность задачи обусловлена необходимостью учесть в зоне резания одновременно граничные условия второго рода, а за пределами этой зоны – граничное условие третьего рода. Как следствие, тепловая задача характеризуется разрывными (неоднородными) граничными условиями, для учета которых необходимо применять специальные математические приёмы [2]. Полученное решение из [2] учитывает влияние температуры СОТС на температуру шлифования. В это решение СОТС введено через коэффициент теплообмена α .

На основании обобщения исследований В.А. Сипайлова В.П. Ларшин в своих работах [8, 9] предлагает следующий подход к определению температуры шлифования на поверхности и по глубине поверхностного слоя. Сущность этого подхода заключается в том, что температурный цикл шлифования разбивается на два последовательных этапа времени, как это в действительности и имеет место. На первом этапе происходит нагрев обрабатываемой поверхности в течение времени воздействия источника тепла с плотностью теплового потока q . На втором этапе, для которого начальные условия создаются на этапе нагрева, происходит охлаждение обрабатываемой поверхности в условиях её теплообмена с СОТС. Температурное поле на этапе нагрева описывается математической зависимостью, представляющей собой решение одномерного дифференциального уравнения теплопроводности. Эта зависимость из [3] имеет вид

$$T = 2\pi\sqrt{H} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{X}{2\sqrt{H}} \frac{2qa}{\pi\lambda V}, \quad (1)$$

где H – безразмерная полуширина теплового источника, $H = \frac{Vh}{2a}$; V – скорость перемещения источника тепла, м/с; h – полуширина полосового источника тепла, м; X – безразмерная координата, $X = \frac{Vx}{2a}$; x – размерная координата, м; q – интенсивность теплового потока, Вт/м²; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Очевидно, что распределение температуры по глубине поверхностного слоя в конце этапа нагрева является начальным условием для определения температурного поля на этапе охлаждения. Анализ работы [4] по-

зволлил установить, что для определения температуры сверления $T_{охл}(x, t)$ на этапе охлаждения (с начальными условиями, полученными на этапе нагрева) можно использовать следующее уравнение:

$$\begin{aligned}
 T_{охл}(x, t) = & \int_0^{\infty} \left[\frac{1}{2\sqrt{\pi at}} \left\{ \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) + \exp\left(-\frac{(x+x')^2}{4at}\right) \right\} - \right. \\
 & - A \exp(atA^2 + A(x+x')) \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x+x'}{2\sqrt{at}} + A\sqrt{at}\right) \left. \right] \times f(x') dx' + \\
 & + aA \int_0^t \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4a(t-\tau)}\right)}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} - A \cdot \exp(a \cdot A^2(t-\tau) + A \cdot x) \times \\
 & \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t-\tau)}} + A\sqrt{a(t-\tau)}\right) \varphi(\tau) d\tau, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где t – время охлаждения, с; A – приведенный коэффициент теплообмена, $A = \frac{\alpha}{a}$; α – коэффициент теплообмена, Вт/м²·°С.

Причем в выражении (2)

$$f(x') = \frac{2q \cdot \sqrt{a \cdot t_H}}{\lambda} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x'^2}{4a \cdot t_H}\right) - \frac{x'}{2\sqrt{a \cdot t_H}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x'}{2\sqrt{a \cdot t_H}}\right) \right] + T_0,$$

где T_0 – исходная температура обрабатываемого материала, °С; t_H – время нагрева, с.

Совокупность уравнений (1) и (2) описывает температурное поле при операциях механической обработки на этапах нагрева и охлаждения обрабатываемой поверхности, соответственно. Единство задачи обеспечивается тем, что температура любой точки поверхности и поверхностного слоя в конце временного этапа нагрева равна соответствующей температуре в начале временного этапа охлаждения.

В технической литературе по шлифованию до сих пор нет исследований температурного поля по уравнению (2), которое имеет ряд важных особенностей. Это уравнение позволяет учесть не только охлаждающие свойства СОТС, но также температуру в функциональной связи от времени $\varphi(\tau)$.

В настоящем исследовании структурные составляющие ПКМ схематизированы следующим образом: волокна ПКМ рассматриваются как неограниченный теплопроводящий цилиндр, а матрица, окружающая волокно, – как неограниченный параллелепипед с квадратным сечением.

Кроме этого, коэффициент теплопроводности ПКМ принимали как приведенный для двухкомпонентной среды с детерминированным расположением составляющих ПКМ по выражению

$$\lambda_{np} = \frac{\sum_{i=1}^2 \Delta_i}{\sum_{i=1}^2 (\Delta_i / \lambda_i)},$$

где Δ_i – толщина i -й структурной составляющей.

Оценку температуры проводили по уравнению (2) в среде MathCAD при следующих данных, характеризующих процесс сверления ПКМ, а именно – углепластика марки КМУ-11э, алмазным инструментом: диаметр алмазного сверла $D=10$ мм. Параметры режима обработки: частота вращения шпинделя $n=10000$ об/мин, $S=0,15$ мм/об.

Физико-механические и теплофизические характеристики ПКМ, необходимые для расчёта температурного поля, приведены в таблице.

Характеристики ПКМ

Марка материала	Плотность, кгс/м ³	Теплопроводность, λ_{np} , Вт·(м ⁻¹ ·К ⁻¹)	Температуропроводность, a , м ² /с	Теплоемкость, ккал/(кг·С), при 25...200 °С
Углепластик	1520	0,58	$2 \cdot 10^{-4}$	0,30...0,36

Плотность теплового потока вычисляли по формуле из [2]

$$q = \frac{P_z v_{кр}}{S_{нл}}, \quad (3)$$

где P_z – сила резания, Н; $v_{кр}$ – скорость резания, м/с; $S_{нл}$ – площадь зоны контакта, м².

В формуле (3) числитель дроби выражает общую тепловую мощность, выделяющуюся в зоне контакта, поэтому, подставив вместо мощности значения экспериментально замеренного крутящего момента при сверлении ПКМ, получили измененную формулу, справедливую в системе СИ:

$$q = \frac{M_{кр} n}{716200 \cdot 1,36 \cdot S_{нл}}, \quad (4)$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент на сверле, Н·м.

После подстановки значений крутящего момента и площади контакта в (4) получили интенсивность теплового потока $q=1,98$ Вт/м².

Время нагрева t_i и охлаждения t на соответствующих этапах сверления меняли в одинаковых интервалах: $0 \leq t_i \leq 0,1$ с и $0 \leq t \leq 0,1$ с.

Результаты расчета приведены на рис. 3.

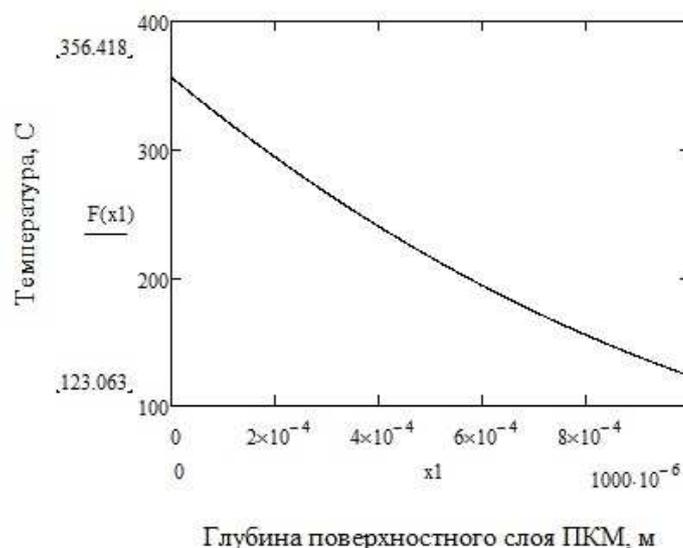


Рис. 3. Изменение температуры по глубине поверхностного слоя ПКМ на этапе нагрева при алмазном сверлении

По предложенному уравнению (2) определена температура при сверлении во времени и по глубине поверхностного слоя ПКМ.

Выражение (2) возможно использовать для учёта влияния СОТС на изменение температурного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор №02.G25.31.0016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ №218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Список литературы

1. А.В. Якимов [и др.]. Теплофизика механической обработки: учеб. пособие. Киев; Одесса: Лыбидь, 1991. 240 с.
2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.
3. Аналитические методы исследования тепловых явлений при шлифовании: учеб. пособие / А.Н. Паршаков [и др.]. Пермь: Изд-во ПГУ, 1977. 72 с.
4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / М.: Наука, 1964. 487 с.
5. Дударев А.С. Определение микропрофиля поверхности образованной механической обработкой лезвийным и алмазно-абразивным инструментом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 2. С. 183 – 191.

6. Иванов О.А. Повышение эффективности лезвийной обработки композиционных углепластиков на основе учёта их физико-механических характеристик: автореф. дис.... канд. техн. наук. СПб., 2006. 22 с.

7. Мелентьев Р.Ю. Компьютерное моделирование теплового поля в элементарном объёме полимерных композиционных материалов // Проблемы машиностроения. Т. 17. № 2. С. 3 – 8.

8. Ларшин В.П., Ковальчук Е.Н., Якимов А.В. Применение решений дефектного слоя при шлифовании // Межвуз. сб. науч. тр. Пермь: Изд-во ППИ, 1986. С. 9 – 16.

9. Ларшин В.П., Лищенко Н.В. Температурное поле при шлифовании с учётом влияния СОЖ // Сб. науч. труд. Междунар. науч.-техн. конф. «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении», 19 – 22 сентября 2011. Одесса; Киев: АТМ Украины, 2011. С. 107 – 111.

Дударев Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доц., fanta88@mail.ru, Россия, Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Свирищев Валентин Иванович, д-р техн. наук, проф., svirshchev_valentin@mail.ru, Россия, Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

EVALUATION OF THE TEMPERATURE FIELD AT DIAMOND DRILLING OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

A.S. Dudarev, V.I. Svirshchev

The article provides a review of important thermal problem of the definition temperature in the cutting zone caused by the drilling process polymer composite materials, for example CFRP. Polymer composite materials have characteristics during mechanical processing, characterized anisotrop-governmental physico-mechanical and thermal properties, extremely low heat conductivity. Known approaches for determining temperature field when processing the processing of metals. The proposed analytical solution of nonlinear differential-equations ferentiating teploprovodnosti. Polymer composite material is presented as a two-component system.

Key words: diamond, drilling, polymer composite materials, temperature, thermal conductivity, temperature field.

Dudarev Aleksandr Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, fanta88@mail.ru, Russia, Perm, Perm National Research Polytechnic University,

Svirshchev Valentin Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, svirshchev_valentin@mail.ru, Russia, Perm, Perm National Research Polytechnic University

ИМИТАЦИОННАЯ ЭВРИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

Е.Д. Агафонов, Г.В. Ващенко

Рассматриваются имитационные модели процессов, протекающих в магистральном нефтепроводе. Предложен эвристический подход к созданию модели участка трубопровода, и реализующий его алгоритм. Модель имеет дискретную природу и построена на основе физических закономерностей гидродинамики. Приведены иллюстрации работы алгоритма, даны рекомендации к его настройке.

Ключевые слова: магистральный нефтепровод, гидродинамика, имитационная модель

В теории и практике анализа данных существует обширный класс задач прогноза технологических параметров сложных технических объектов с целью управления, обеспечения безаварийной работы, оптимизации технологических режимов и экономии ресурсов. Инструментарий, применяемый для решения задачи прогноза, будет зависеть от типа рассматриваемого объекта, его фундаментальных свойств и доступной информации об объекте.

Любая задача анализа данных, в том числе и задача прогноза технологических параметров, сводится к построению модели объекта. Методология построения математических моделей объектов различной природы входит в предмет теории идентификации [2], [8]. Выбор того или иного метода идентификации зависит от уровня априорной информации об исследуемом объекте, и чем больше неопределенность, тем сложнее с ним работать.

Наряду с методами теории идентификации существует технология имитационного моделирования [3], которая также предлагает один из способов преодоления неопределенности в процессе построения модели объекта. При имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы во времени. Имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени [7]. Имитационные модели применяются при отсутствии аналитических моделей объекта, либо в случае, когда не разработаны методы решения полученной модели.

Магистральный нефтепровод – сложное техническое сооружение, эксплуатация которого на сегодняшний день невозможна без решения задач контроля, диагностики и управления. Перечисленные задачи неразрывно связаны с измерением параметров технологического процесса, их

обработкой и принятием решений о режимах работы технологического оборудования нефтепровода. На всех этапах эксплуатации оборудования магистрального нефтепровода требуется привлечение математических моделей. В частности, существует необходимость создания моделей магистральных трубопроводов с целью прогноза развития гидравлических процессов, расхода электроэнергии при эксплуатации насосов, управления процессом перекачки в целом, а также обеспечения безопасности функционирования оборудования магистрального нефтепровода.

В зависимости от своего назначения выделяют следующие типы моделей:

- модели статических процессов в трубопроводе (используются для расчета установившихся режимов магистрального нефтепровода);
- модели неуставившихся процессов (необходимы для описания переходов между технологическими режимами).

В качестве основного подхода к построению моделей технологических режимов перекачки нефти в АО «Транснефть – Западная Сибирь» в настоящее время принимается процедура создания статических моделей течения нефти. Модель представляет собой большую систему нелинейных алгебраических уравнений, сформированную в соответствии с законами Кирхгофа для трубопроводной сети [5]. Уравнения описывают установившиеся процессы, происходящие в узлах и независимых контурах сети. Для численного решения системы уравнений применяется модифицированный метод последовательных приближений [6].

Практика эксплуатации магистрального нефтепровода показывает, что среднее время, в течение которого происходит переход от одного стационарного технологического режима к другому, нередко превышает время работы в рамках какого-либо из стационарных режимов. Вследствие этого для эффективного управления процессами планирования расхода энергоресурсов возникает необходимость в построении нестационарных гидродинамических моделей, описывающих переходные процессы в магистральном трубопроводе.

Привлечение технологии имитационного моделирования процессов в магистральном нефтепроводе обусловлено кроме других причин еще и тем фактом, что зачастую предприятия, эксплуатирующие нефтепровод, не обладают целостными и объективными данными измерения параметров технологического процесса. Сбор данных о технологических параметрах производится с разными целями разными подразделениями (службами) компании – эксплуатанта магистрального нефтепровода. Наибольшее значение придается данным, имеющим решающее значение в выполнении целевых показателей, таких, как объемы перекачки нефти, расход энергоресурсов. Также осуществляется мониторинг параметров, влияющих на безопасность эксплуатации оборудования.

Вследствие сказанного наблюдаются рассогласованность и физическая раздробленность данных измерений, в них присутствуют многочисленные пропуски. Негативную роль играет тот факт, что одновременно эксплуатируется измерительное оборудование и системы различных поколений, разных производителей и так далее.

Хорошо известен и развит подход к моделированию гидродинамических процессов в магистральном нефтепроводе с использованием дифференциальных уравнений в частных производных, в том числе уравнений Навье – Стокса [1]. При этом существует проблема аналитической неразрешимости таких уравнений, при их построении делается множество допущений, таких как слабая сжимаемость жидкости, неизменная вязкость, ньютоновский характер описания жидкости и т. д. На практике классические модели гидродинамики требуют настройки, в том числе с привлечением экспертов, а также применения численных методов для их построения, т. е. обладают всеми признаками имитационных моделей.

Настоящая работа направлена на построение эвристической имитационной модели гидродинамических процессов в магистральном нефтепроводе в ситуации недостатка и рассогласованности измерений технологических параметров. Она содержит описание одного подхода к синтезу эвристической модели неустановившихся процессов в трубопроводе.

1. Принцип построения модели

Предложим эвристический подход к построению гидродинамических моделей для описания неустановившихся процессов в магистральном нефтепроводе. За основу примем следующее предположение. Пусть участок трубопровода разделен на конечное количество равных сегментов (рис. 1).

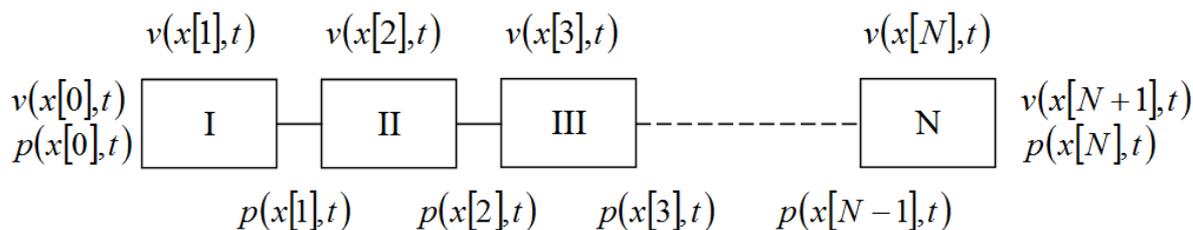


Рис. 1. Схема разбиения участка трубопровода на сегменты

Каждый из участков характеризуется определенным набором свойств протекающей по нему нефти, включая физические ее параметры: плотность, вязкость, температуру, скорость потока, внутренний диаметр трубопровода и т. д. На левой и правой границах каждого сегмента заданы определенные значения давления p .

Задаем временную сетку с шагом Δt , связанным со значением длины сегментов трубопровода Δx через скорость распространения волн давления. В качестве модели течения жидкости в сегменте трубопровода на протяжении временного шага принимаем модель установившегося течения в виде уравнения Бернулли [1]:

$$\frac{P_{вх} - P_{вых}}{\rho g} + (z_{вх} - z_{вых}) = \frac{\lambda(Re, \varepsilon)\Delta x v^2}{2dg},$$

где $P_{вх}$, $P_{вых}$ – давления во входном и выходном сечениях сегмента трубопровода; $z_{вх}$, $z_{вых}$ – геометрические высоты указанных сечений; d – внутренний диаметр трубопровода; g – ускорение силы тяжести, ρ – плотность; v – скорость потока жидкости в трубопроводе. Коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda(Re, \varepsilon)$ может быть рассчитан в соответствии с методикой, принятой в гидродинамике [1], [4]. Левая часть уравнения представляет собой суммарную разницу напоров на концах сегмента трубопровода, в правой части – потеря напора за счет действия сил трения жидкости о стенки трубопровода.

Из уравнения Бернулли выражаем силу трения, действующую на поток жидкости в трубопроводе для дискретного значения времени $[t]$:

$$F_{mp}[t] = \frac{\lambda(Re, \varepsilon)\Delta x S v[t]v[t]\rho[t]}{2d}, \quad (1)$$

где плотность жидкости находится, например, из соотношения

$$\rho[t] = \rho_0 + \beta \rho_0 (p_{вх}[t]/2 + p_{вых}[t]/2 - p_0),$$

где β – коэффициент сжимаемости жидкости [1/Па]; ρ_0 – плотность жидкости при нормальных условиях.

Таким образом, принимается линейный закон изменения плотности в зависимости от среднего давления жидкости в сегменте модели.

Жидкость в рассматриваемом сегменте, в свою очередь, приводится в движение силой напора, вызванной разницей давлений на краях сегмента:

$$F_{нан}[t] = (p_{вх}[t] - p_{вых}[t])S + (z_{вх} - z_{вых})g\rho[t]S.$$

Жидкость в момент времени $[t]$ подвергается действию суммарной силы $F_{нан}[t] - F_{mp}[t]$. Это приводит к движению жидкости с ускорением:

$$a[t+1] = (F_{нан}[t] - F_{mp}[t]) / \rho[t]\Delta x S. \quad (2)$$

С учетом (2) можно пересчитать скорость потока для следующего момента времени $[t+1]$:

$$v[t+1] = v[t] + \Delta t (F_{нан} - F_{mp}) / \rho[t]\Delta x S.$$

Скоростной напор жидкости приводит к изменению давлений в границах между соседними сегментами:

$$p[t+1] = p[t] + \rho_{вх}[t]v_{вх}[t+1]v_{вх}[t+1] - \rho_{вых}[t]v_{вых}[t+1]v_{вых}[t+1] \quad (3)$$

Давления (3) пересчитываются для всех граничных точек и служат исходными данными для дальнейшего расчета в соответствии с формулой (1) и далее. Таким образом, получаем циклический алгоритм, позволяющий прогнозировать протекание процессов в участке трубопровода с течением времени.

2. Численные эксперименты с алгоритмом построения эвристической модели

Описанный алгоритм был реализован в виде программы в системе MATLAB 2012. Исходные данные при построении моделей включают значения следующих параметров:

- плотность жидкости $\rho_0 = 820 \text{ кг/м}^3$;
- длина участка трубопровода $L = 2000 \text{ м}$;
- длина расчетного сегмента $\Delta x = 125 \text{ м}$;
- внутренний диаметр трубопровода $d = 0,72 \text{ м}$;
- относительная шероховатость внутренних стенок трубопровода $\varepsilon = 2,78 \cdot 10^{-4}$;
- скорость распространения волн давления $c = 1000 \text{ м/с}$;
- ускорение силы тяжести $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;
- характеристика профиля трубопровода – горизонтальный по всей длине участка;
- базовое давление в трубопроводе $p_0 = 101325 \text{ Па}$ для экспериментов I и II, $p_0 = 506625 \text{ Па}$ для эксперимента III.

Первый эксперимент представляет собой отображение реакции системы на ступенчатое воздействие по давлению в левом граничном сечении. Начальные условия выбраны следующим образом:

$$v(x,0) = 0, p(x,0) = p_0.$$

В правом граничном сечении располагается заглушка, что соответствует следующему граничному условию:

$$v(L,t) = 0.$$

Граничное условие в левом сечении в соответствии с условием эксперимента

$$p(0,t) = 0, t > 0.$$

Расчетные значения давления в зависимости от времени и координаты сечения трубопровода для численного эксперимента I представлены на рис. 2.

Основные характеристики полученной модели, которые требуют настройки:

- степень затухания;
- скорость распространения волн.

Степень затухания волн давления в модели может значительно отличаться от фактической. Следовательно, для решения практических задач требуется настройка коэффициентов гидравлического сопротивления. Скорость затухания должна настраиваться по данным измерений линейных датчиков давления магистрального нефтепровода.

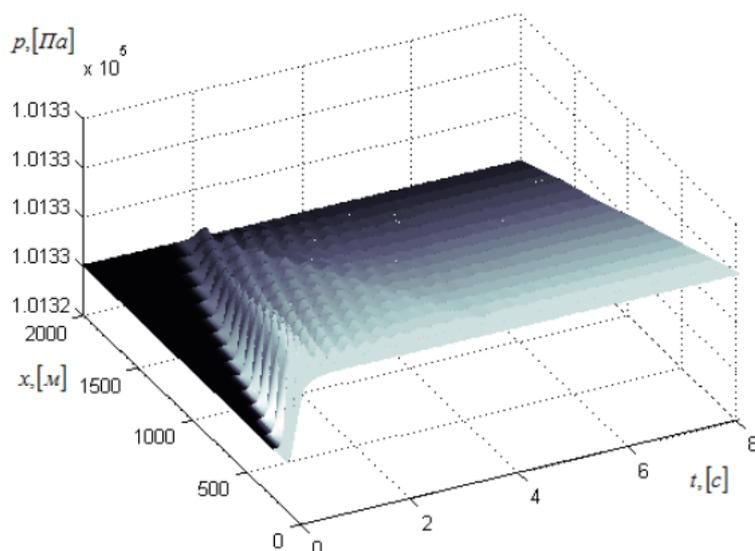


Рис. 2. Расчетные значения давления в зависимости от времени и координаты сечения трубопровода для численного эксперимента I

Осцилляции в эвристической модели обусловлены способом ее формирования из моделей конечных сегментов, в которых кинетическая энергия движущейся жидкости переходит в потенциальную энергию разности давлений и наоборот. В данном случае осциллирующий характер согласуется с данными наблюдений процессов в трубопроводе. Период осцилляций связан с шагом разбиения участка трубопровода на сегменты, следовательно, выбор величин и будет основан на параметрах волновых характеристик распространения возмущений в трубопроводе.

Скорость распространения волн давления в представленной эвристической модели не является постоянной. В этом смысле можно предполагать, что модель учитывает эффект присоединенных масс, что требует более тщательного анализа.

Рис. 3 иллюстрирует процессы, происходящие в результате подачи кратковременного прямоугольного импульса по давлению в крайнем левом сечении трубопровода. Волна давления отражается от заглушки, расположенной в крайнем правом сечении участка трубопровода.

На рис. 4 изображен результат модельного эксперимента по включению насоса, расположенного в середине моделируемого участка трубопровода. Для учета граничных условий в сечении с координатой расположения насоса используется связь давления и скорости течения жидкости,

заданная расходонапорной характеристикой насоса (за основу брали кубическую аппроксимацию характеристики для центробежного магистрального насоса НМ3500-230) [4].

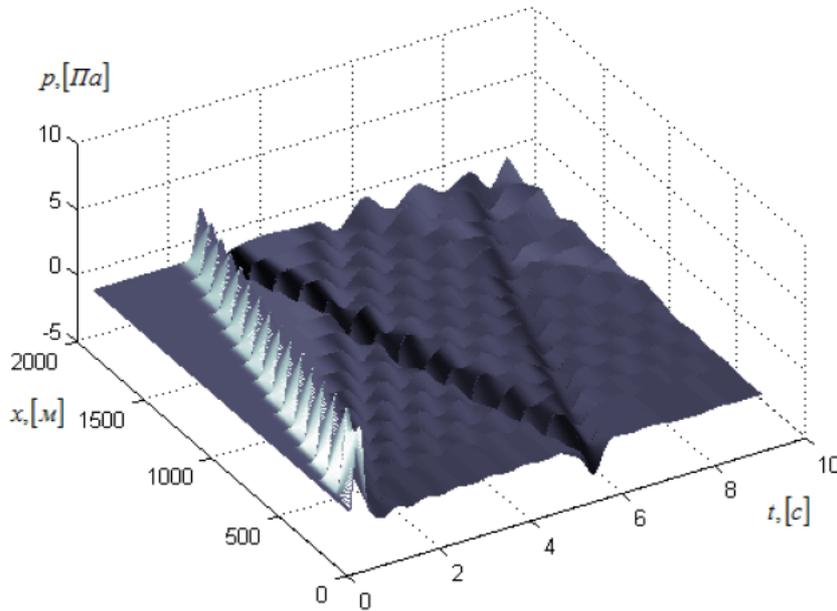


Рис. 3. Расчетные значения давления в зависимости от времени и координаты сечения трубопровода для численного эксперимента II

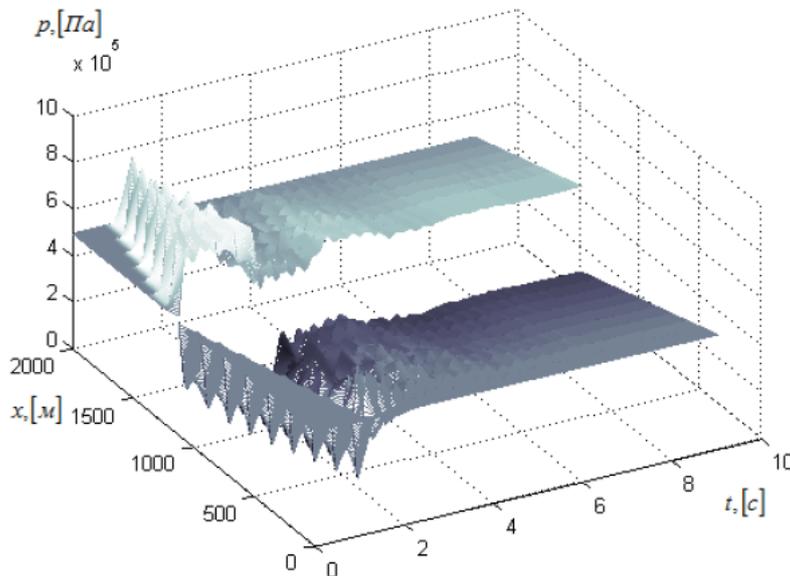


Рис. 4. Расчетные значения давления в зависимости от времени и координаты сечения трубопровода для численного эксперимента III

В результате получили зависимости давления потока жидкости от координаты и времени, которые качественно соответствуют процессам, протекающим в магистральном нефтепроводе. Количественный анализ

предложенного алгоритма будет возможен в процессе настройки моделей по данным измерений технологических параметров магистрального нефтепровода.

Заключение

Настоящая статья содержит описание алгоритма построения эвристической имитационной модели неустановившихся процессов в магистральном нефтепроводе, построенного на основе физического описания конечного множества выделенных в трубопроводе сегментов. Обсуждены вопросы учета начальных и граничных условий в модели, приведены иллюстрации, полученные при программной реализации представленного алгоритма.

Представленный подход к построению имитационных моделей участка магистрального нефтепровода позволяет проанализировать происходящие гидродинамические процессы с качественной стороны. Количественный анализ возможен в случае реализации шагов по совершенствованию измерительной аппаратуры, современных средств сбора и хранения данных измерений технологических параметров.

Список литературы

1. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 336 с.
2. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 2003. 432 с.
3. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование: теория и технологии. М.: Альтекс, 2004. 384 с.
4. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов / П.И. Тугунов [и др.]. Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002. 658 с.
5. Файзуллин Р.Т. О решении нелинейных алгебраических систем гидравлики // Сибирский журнал индустриальной математики. 1999. № 2. С. 176-184.
6. Файзуллин Р.Т., Мызников А.М. Уточнение коэффициентов сопротивления в сложных гидравлических сетях по результатам ограниченного числа измерений // Теплофизика и аэромеханика. 2005. № 3. С. 513-516.
7. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
8. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 680 с.

Агафонов Евгений Дмитриевич, канд. техн. наук, доц., agafonov@gmx.de, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет,

Ващенко Галина Вадимовна, канд. физ.-мат. наук, проф., vgvtogsm@yandex.ru,
Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет

HEURISTIC SIMULATION MODEL OF TRUNK PIPELINE

E.D. Agafonov, G.V. Vashenko

In the paper simulation models of processes in trunk pipeline are considered. A heuristic approach for pipeline segment modeling is proposed. One discusses algorithmic solution of the approach. The model is originally discreet, and it is based on principles of hydrodynamics. Some considerations on tuning of the model, as its well as graphical representation are also provided in the paper.

Key words: trunk pipeline, hydrodynamics, simulation model.

Agafonov Evgeniy Dmitrievich, candidate of technical sciences, docent, agafonov@gmx.de, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University,

Vashenko Galina Vadimovna, candidate of physical mathematical sciences, docent, vgvtogsm@yandex.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University

УДК 62-835; 51-74

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Н.И. Куликов, А.В. Макаренко, А.Е. Сорокин

На основе комплексного подхода рассмотрено современное состояние разработок и области применения литий-ионных источников питания в мехатронных модулях автономных мобильных объектов. Показана их конкурентоспособность по сравнению с щелочными и кислотными источниками питания. Проанализированы системные подходы и схемотехнические решения, используемые при проектировании литий-ионных аккумуляторных батарей с микропроцессорными системами контроля и управления в мехатронных модулях автономных мобильных объектов.

Ключевые слова: мехатронный модуль, аккумуляторная батарея, литий-ионный аккумулятор, система контроля и защиты, устройство нивелирования напряжений, байпасное устройство, автономный мобильный объект.

За последнее десятилетие в связи с бурным развитием технологий производства литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) в мехатронных модулях автономных мобильных объектов значительно расширилась их номенклатура, в том числе аккумуляторов емкостью десятки и сотни Ампер*часов. Это связано с применением в ЛИА новых электродных материалов вместо

традиционных анодных материалов на основе углерода и катодных материалов на базе литированных оксидов Co, Mn, Ni, а также с совершенствованием конструкции и технологии изготовления ЛИА, позволивших обеспечить высокий уровень безопасности даже при их работе в нештатных режимах эксплуатации [1].

Наиболее активно ЛИА внедряются в объекты специальной и военной техники: космические аппараты, ракетные комплексы, пилотируемую и беспилотную авиацию, необитаемые и обитаемые подводные аппараты, медицинскую технику и др. По мере сближения стоимости герметизированных свинцово-кислотных и литий-ионных аккумуляторов последние становятся все более перспективными для различных применений, в том числе в системах бесперебойного электропитания, что связано с высокими удельными энергетическими и мощностными характеристиками, повышенным сроком службы и КПД, отсутствием газовыделения (водород) из электролита при высоких и деградации (сульфатации) электродов при низких потенциалах.

Переход на электроды, использующие модифицированные наноразмерные материалы (прежде всего литированный оксид титана и литированный фосфат железа), позволил увеличить ресурс работы ЛИА при глубоких (70...80 %) разрядах до 3000...5000 циклов. При этом удельная энергия ЛИА с нанотитанатными анодами достигает 80 Вт*ч/кг, а с нанофосфатными катодами – 140 Вт*ч/кг (теоретически достижимая удельная энергия ЛИА – 890 Вт*ч/кг) Новые электроды наряду с модифицированными электролитами позволяют эффективно (на 50...80 %) разряжать ЛИА при температурах до минус 40 °С. Кроме того, за последние несколько лет благодаря интенсивному росту объемов производства высокоемких ЛИА в Китае произошло резкое (в несколько раз) снижение стоимости ЛИА: многие производители предлагают свои ЛИА энергетических серий по цене от 0,5 до 1 \$/Вт*ч.

В связи с вышесказанным области применения батарей ЛИА непрерывно расширяются: кроме практически 100 % применения в портативных бытовых устройствах связи, фото- и видеотехники они активно вытесняют из традиционных областей мобильных и стационарных применений не только относительно дорогие щелочные (никель-кадмиевые, никель-металлогидридные и др.) аккумуляторы, но и свинцово-кислотные аккумуляторы (СКА) большой емкости.

Многообразие областей применения ЛИА определяет не только большую номенклатуру производимых емкостей и типоразмеров аккумуляторов, но и широкие диапазоны напряжений (от семи до нескольких сотен Вольт) батарей на их основе, необходимые для реализации высоких мощностных, энергетических и эксплуатационных характеристик электрических накопителей.

При проектировании для всех литий-ионных АБ общими требованиями являются обеспечение безопасности и удобства эксплуатации, а также достижение при циклическом режиме работы полного разряда всех ЛИА, а не работа по графику наиболее слабого элемента. Это достигается введением в состав АБ электронной системы контроля и управления (СКУ), осуществляющей мониторинг состояния и защиту батареи от возникновения опасных режимов работы и предоставляющего пользователю информацию об ее основных параметрах.

Защита от возникновения опасных режимов работы осуществляется путем нивелирования разбаланса напряжений ЛИА и формирования управляющих сигналов для изменения режима работы внешних устройств или для отключения батареи от внешних силовых цепей с помощью коммутационной аппаратуры, конструктивно размещаемой как в составе АБ, так и вне ее [2].

Для защиты АБ от перезаряда и переразряда СКУ осуществляет измерение напряжения каждого ЛИА в батарее. При этом измерительные цепи всех аккумуляторов должны быть гальванически развязаны и рассчитаны на работу при напряжении, соответствующем максимальному напряжению АБ. Для большинства применений точность измерения напряжения ЛИА должна быть не хуже ± 20 мВ. При формировании управляющих сигналов по уровню напряжений ЛИА необходимо учитывать падение напряжения на их внутреннем сопротивлении и температуру аккумулятора.

Поэлементный контроль температуры ЛИА необходим также для защиты АБ от перегрева. В последнее время для этих целей часто применяются датчики температуры с цифровым или аналоговым выходом, относительно простые в использовании и обеспечивающие точность измерения $\pm(1...2)$ °С. Терморезисторы или термопары продолжают использоваться для ряда специальных применений, связанных с работой АБ в экстремальных условиях или с ограничениями в использовании импортной элементной базы.

Для измерения тока в АБ наряду с шунтами используются датчики тока холловского типа, широкая номенклатура которых позволяет измерять токи в диапазоне от 10 до 1000 А с точностью порядка $\pm 2\%$. Кроме подсчета зарядной и разрядной емкостей АБ, величина тока необходима для расчета корректирующих поправок к измеренным значениям напряжения ЛИА. Датчики тока также могут быть использованы для защиты от токовых перегрузок силовых цепей АБ наряду с плавкими вставками или самовосстанавливающимися предохранителями, которые защищают АБ только от токов короткого замыкания (КЗ) и неэффективны при относительно небольших (1,5- – 2-кратных) токовых перегрузках.

Наиболее сложно реализуемой задачей является обеспечение работоспособности АБ при отказах (КЗ или обрыв) внутри ЛИА. Обрыв в ЛИА наиболее опасен при их последовательном соединении в АБ, короткое замыкание – при их параллельном соединении.

Защита от внутренних КЗ в основном строится на уровне ЛИА при их изготовлении:

сепараторы, плавящиеся при превышении допустимых токов;
самовосстанавливающиеся температурные предохранители различных типов;

токопроходы, разрушающиеся при повышении давления внутри аккумулятора, и др.

При параллельном соединении ЛИА дополнительно для защиты от последствий внутренних КЗ последовательно с каждым из них устанавливается плавкая вставка.

Для сохранения работоспособности АБ при отказе одного из ЛИА при их последовательном соединении необходимо вывести его из силовой цепи, одновременно сохранив ее целостность. Для этого используются электромеханические или электронные байпасные устройства, которые управляются СКУ [3]. Они могут устанавливаться непосредственно на борнах ЛИА для отвода через них выделяющегося в байпасном устройстве тепла (рис. 1).

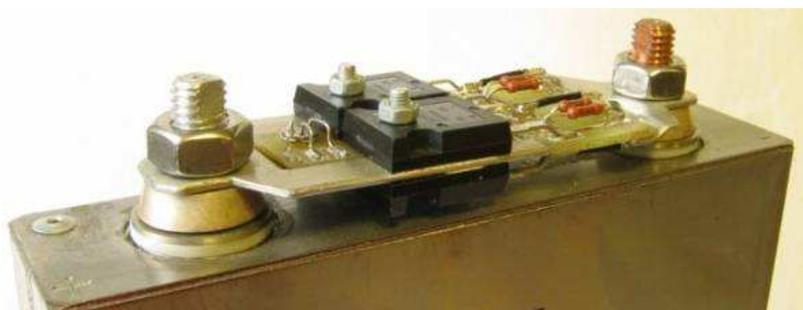


Рис. 1. Электронное байпасное устройство на рабочие токи до 100 Ампер

Важной функцией СКУ является аппаратное выравнивание степени заряженности (нивелирование разбаланса напряжений) единичных аккумуляторов в АБ. Причиной разбаланса напряжений является различие в степени заряженности аккумуляторов, обусловленное различиями в скоростях их саморазряда. Саморазряд обусловлен как токами утечек через внешние и внутренние электрические цепи аккумуляторов, так и электрохимическими процессами, протекающими на их электродах. Следствием разбаланса напряжений является работа батареи по «худшему» (наиболее разряженному) аккумулятору, даже если он имеет наибольшую номинальную емкость среди всех аккумуляторов в батарее.

Наиболее простым, но достаточно эффективным системным методом нивелирования разбаланса в АБ большой и сверхбольшой емкости является ее заряд многоканальным зарядным устройством. Для низковольтных портативных АБ хорошо зарекомендовали себя схемотехнические решения, обеспечивающие автоматическую перекоммутацию АБ с последовательной схемы на параллельную при подключении к ней специализированного зарядного устройства [4].

В активных выравнивающих устройствах обычно реализуются трансформаторные схемы перераспределения энергии в АБ или используется подзаряд «отстающих» ЛИА от одного или нескольких источников постоянного тока, питание которых осуществляется с выхода АБ или от внешнего источника энергии (например, зарядного устройства). Такие устройства, обеспечивающие большие выравнивающие токи, позволяют не только нивелировать разбаланс напряжений в АБ, но и обеспечивать ее полный разряд, а не работать по графику худшего ЛИА.

На рис. 2 показан выполненный на отечественной элементной базе трансформаторный блок ТБНН-15А, позволяющий при разбалансе напряжений в 1 В обеспечить перетекающие токи между ЛИА в АБ до 15 А. При испытаниях уже на первом цикле выравнивания он позволил увеличить разрядную емкость разбалансированной АБ с 7,2 до 13,3 А*ч. В последующих (2 – 5) циклах, несмотря на частичную потерю ЛИА своей емкости, он позволил разрядить АБ на 15,3 А*ч, обеспечивая при этом одновременный полный разряд всех ЛИА.

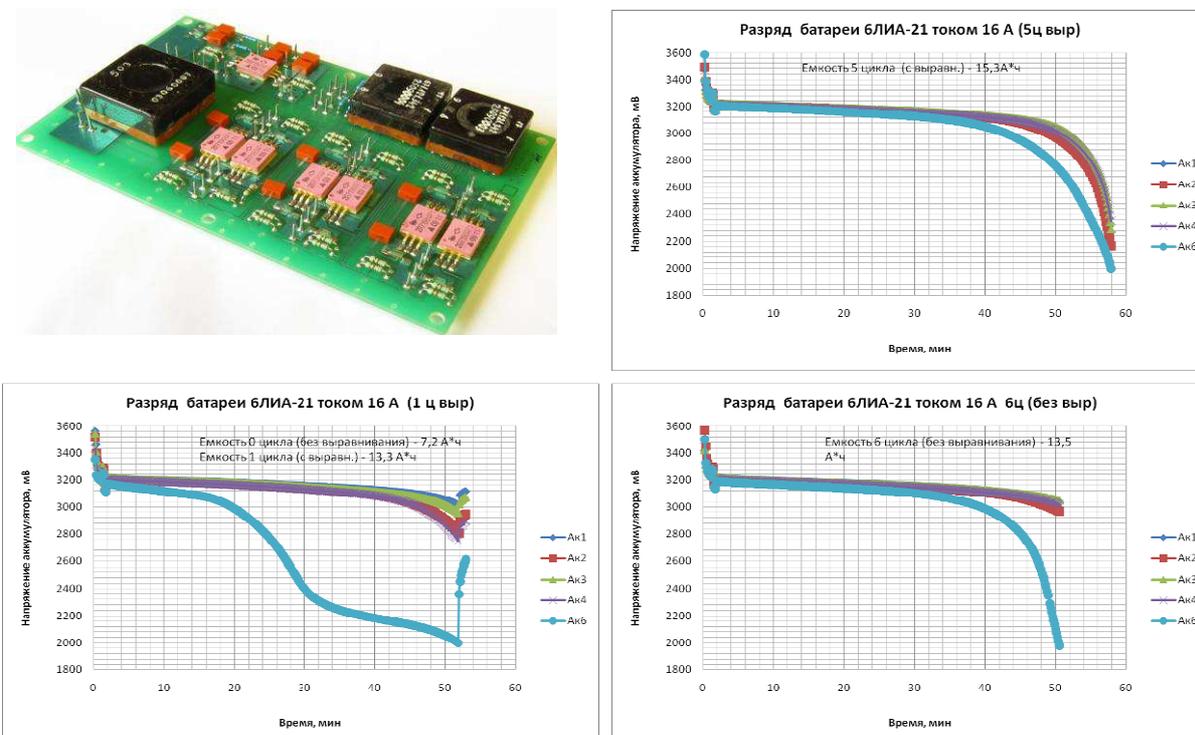


Рис. 2. Внешний вид и графики, иллюстрирующие работу трансформаторного блока выравнивания напряжения ТБНН-15А [3]

Для удобства эксплуатации АБ информация о ее состоянии может передаваться во внешнюю систему управления по стандартному цифровому каналу, выводиться на дисплей или отображаться с помощью светодиодов, используя интуитивно понятную «светофорную» цветовую символику, индицируя состояние одного из параметров АБ в трех градациях: «Норма», «Предупреждение», «Авария». При необходимости, используя один двухцветный светодиод в режимах постоянного и прерывистого свечения, можно отображать до 10 состояний одного из параметров АБ.

На рис. 3 показан источник бесперебойного электропитания для имплантируемой системы вспомогательного кровообращения на базе двух литий-ионных АБ емкостью 10 и 1,5 А*ч, степень заряженности которых индицируется двумя светодиодами, реализующими 6 градаций состояния заряда основной и резервной АБ.

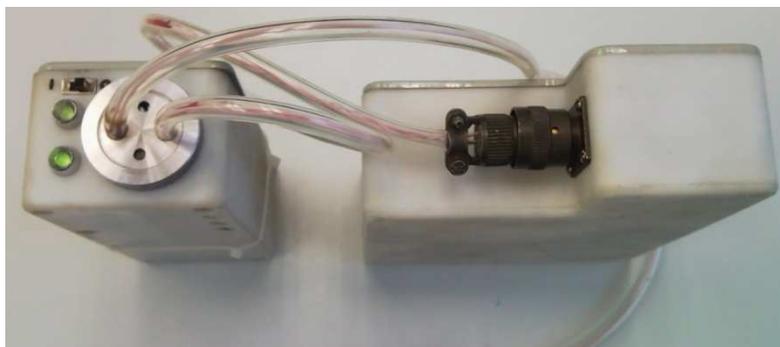


Рис. 3. Источник бесперебойного электропитания на базе основной (14В/10А*ч) и резервной (14В/1,5А*ч) АБ на ЛИА фирмы «Кокат»

Необходимо отметить особо, что основным принципом построения системы питания, приведенной на рис. 3, является применение комбинированной (гибридной) энергоустановки, содержащей источники энергии и источники мощности. Целесообразность применения комбинированной системы обусловлена существенным различием средней и пиковой мощности.

Для достижения необходимого значения пиковой мощности в системе питания предусмотрен электрический накопитель, выполненный на базе электромеханических конденсаторов (ионисторов).

Электролитические конденсаторы, хотя и имеют чрезвычайно низкое внутренне сопротивление, могут использоваться в качестве накопителей только в миллисекундном интервале из-за низких энергетических характеристик.

Ионисторы же по своим характеристикам находятся между электролитическими конденсаторами и химическими аккумуляторами. Время их разряда лежит в диапазоне, измеряемом единицами и десятками секунд. В отличие от химических аккумуляторов принцип их действия основан на

физических явлениях переноса и накопления заряда и не связан с химическими превращениями на электродах. Поэтому они могут работать на более высоких, чем аккумуляторные батареи, частотах, отдавать большую мощность и имеют ресурс работы десятки тысяч часов.

В свою очередь, аккумуляторные батареи являются инерционными источниками тока, они плохо работают в импульсных режимах с частотами выше десятых долей Гц. Однако аккумуляторы могут поддерживать заданный ток в течение длительного промежутка времени (измеряемого часами), хотя не обеспечивают высоких разрядных токов. При разряде большими токами резко снижается отдаваемая химическими аккумуляторами электрическая емкость, повышается внутреннее тепловыделение и уменьшается срок их службы.

Высоковольтные высокоемкие АБ следует строить по модульному принципу исходя из требований обеспечения электробезопасности при монтаже и ремонте, а также возможности их транспортировки и монтажа с минимальным использованием подъемно-транспортных механизмов. В них используются СКУ, также построенные по модульному принципу с 2 – 3 уровнями управления.

На рис. 4 показана аккумуляторная батарея с номинальным напряжением 115 В на базе 32 литий-полимерных аккумуляторов фирмы «Кокат» емкостью 40 А*ч с двухуровневой системой контроля, выравнивания и защиты (СКВЗ). Измерение напряжения и температуры ЛИА осуществляют два модуля контроля и выравнивания (МКВ), передающих измеренные данные в блок верхнего уровня – модуль управления (МУ). По его командам они также обеспечивают нивелирование разбаланса напряжений в батарее путем подзаряда отстающих ЛИА с помощью двух источников тока, питающихся с выхода АБ. В модуль управления также поступает информация с модуля датчика тока, которая используется для расчета зарядной и разрядной емкости, а также для защиты АБ от токовых перегрузок.

Защита АБ от опасных режимов работы осуществляется путем формирования предупреждающих и аварийных сигналов (замыкание «сухих» контактов) для внешних устройств (зарядного устройства, нагрузки). Информация об основных параметрах АБ и сформированных МУ аварийных и предупредительных сигналах выводится на 4-строчный дисплей в модуле индикации. Индицируемые на дисплее параметры изменяются в зависимости от режима работы АБ.

Архитектура МУ позволяет осуществлять обмен информацией с внешними устройствами по одному или нескольким стандартным цифровым интерфейсам, а также поддерживать работу до 15 модулей нижнего уровня.

Учитывая, что МКВ могут контролировать до 16 ЛИА, данная СКВЗ может быть использованы для построения АБ из 240 ЛИА.

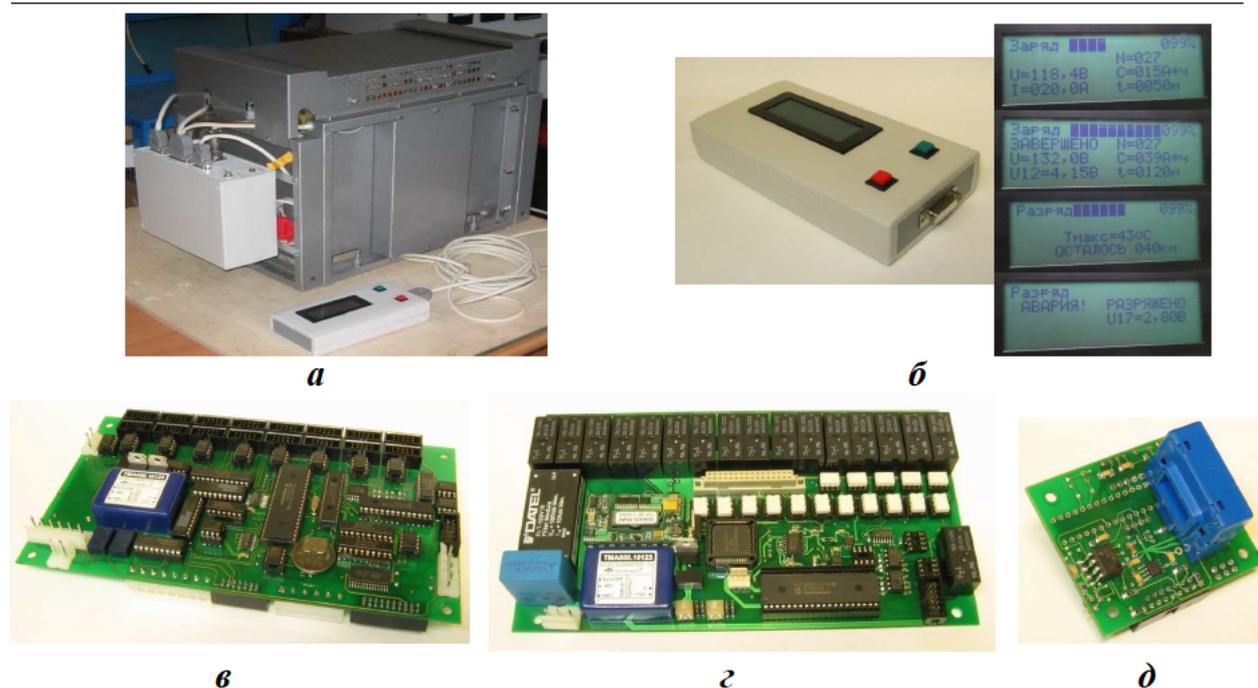


Рис. 4. Аккумуляторная батарея 32ЛИА40 (а) и блоки ее СКВЗ: модуль индикации (б); модуль управления (в); модуль контроля и выравнивания (г); модуль датчика тока (д)

Выводы

1. Наиболее перспективным типом электрических накопителей, используемых в мехатронных модулях автономных мобильных объектов, в настоящее время являются литий-ионные аккумуляторные батареи.

2. Литий-ионные аккумуляторные батареи могут успешно конкурировать не только с щелочными, но и со свинцово-кислотными аккумуляторными батареями в областях их традиционного использования, причем не только по техническим, но и по ценовым параметрам.

3. При проектировании литий-ионных аккумуляторных батарей мехатронных модулей автономных мобильных объектов решение вопросов обеспечения надежности и безопасности их работы приобретает принципиально важное значение.

4. При явно выраженном импульсном характере нагрузки в мехатронных модулях целесообразно применение комбинированных систем питания, содержащих источники энергии и источники мощности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект №32.

Список литературы

1. Груздев А.И. Основные тенденции и направления развития автономной электроэнергетики. Электричество. 2008. №10. С. 2-11.

2. М.Ф. Ганзбург, А.И. Груздев, А.В. Кузовков, В.И. Трофименко Физические проблемы водородной энергетики: тезисы докладов V Российской конференции. СПб., 2009. С. 205-206.

3. Ганзбург М.Ф., Груздев А.И. Трофименко В.И. // Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах: материалы XI Междунар. конф./под. Ред. М.С. Плешакова. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ). 2010. С. 289 – 293.

4. Груздев А.И., Куликов Н.И. Мехатроника, автоматизация, управление . 2007. №8. С. 41- 47.

Куликов Николай Иванович, канд. техн. наук, проф., nik@mai.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),

Макаренко Александр Валерьевич, канд. техн. наук, доц., makarenko@mai.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Сорокин Андрей Евгениевич, канд. экон. наук, доц., зав. кафедрой, sorokin@mai.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

POWER SUPPLIES FOR MEKHATRONNYKH MODULES OF AUTONOMOUS MOBILE OBJECTS

N.I. Kulikov, A.V. Makarenko, A.E. Sorokin

On the basis of an integrated approach the current state of development and a scope of litiesion power supplies in the mekhatronnykh modules of autonomous mobile objects is considered. Their competitiveness in comparison with alkaline and acid power supplies is shown. The system approaches and circuitry decisions used at design of litiesion batteries with microprocessor control and management systems in the mekhatronnykh modules of autonomous mobile objects are analysed.

Key words: the mekhatronnykh module, the battery, lithiumion accumulator, the monitoring system and protection, the device of leveling of tension, the bypass device, autonomous mobile object.

Kulikov Nikolay Ivanovich, candidate of technical sciences, professor, nik@mai.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Makarenko Alexander Valeryevich, candidate of technical sciences, docent, makarenko@mai.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Sorokin Andrey Evgeniyevich, candidate of economic sciences, docent, head of chair, sorokin@mai.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University)

ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ МАШИНОЙ «КАТОК»

С.В. Савельев, Г.Г. Бурый, И.К. Потеряев, А.С. Белодед

Рассмотрено инновационное устройство контроля качества уплотнения грунта дорожными катками, а также его преимущества по сравнению с аналогами. Приведены традиционные методы контроля качества уплотнения грунтов, а также некоторые устройства контроля качества уплотнения грунтов. Описаны недостатки существующих методов и устройств контроля качества уплотнения грунтов. Показаны актуальность и преимущества рассматриваемого инновационного устройства контроля качества уплотнения грунтов.

Ключевые слова: уплотнение, дорожный каток, грунт, устройство, деформирование.

В настоящее время изменение экономической ситуации в стране невозможно без развития транспортной инфраструктуры и сети автомобильных дорог в частности. Долговечность этих объектов во многом зависит от качества уплотнения земляного полотна. При этом необходимо контролировать процесс уплотнения грунтов, так как недоуплотнение может привести к разрушению всех технологических слоев дороги. Также важно рационально использовать дорожные катки, так как их длительная эксплуатация приводит к дополнительным затратам. В процессе масштабного строительства подобные затраты могут превысить миллиарды рублей.

На сегодняшний день используются следующие традиционные методы контроля качества уплотнения.

1. Стандартный метод СоюзДорНИИ прибором определяет основные параметры, характеризующие плотность грунтов. На основании этих параметров определяется уплотняющая способность грунтоуплотняющих машин и назначается рациональный режим их работы. Для измерения параметров грунта на подстаканник прибора в разъемный цилиндр помещается грунт, сверху на давящую платформу, перемещаясь по стойке, сбрасывается гиря, по числу сбрасываний определяют параметры грунта [1, 2, 3].

2. Метод режущего кольца основан на определении объемной массы влажного грунта в объеме металлического кольца [1, 2, 3].

3. Метод статического зондирования основан на погружении зонда в грунт под действием статической вдавливающей нагрузки. При этом измеряются показатели сопротивления грунта при погружении зонда. Метод динамического зондирования основан на погружении зонда в грунт под

действием ударной нагрузки (ударное зондирование) или ударно-вибрационной нагрузки (ударно-вибрационное зондирование) с измерением показателей сопротивления грунта.

4. Метод вдавливания штампа основан на оценке величины модуля деформации грунта, для определения которого на грунт устанавливается круглый штамп, погружаемый с помощью гидравлического домкрата [1, 2, 3].

5. Метод лунок применяется в случае укладки обратных засыпок из щебенистых крупнообломочных грунтов или из грунта с мерзлыми комьями. Для определения объемной массы скелета грунта выравнивается площадка (0,5x0,5 м), выкапывается лунка 0,10...0,15 м (объемом 3 – 5 л), вынутый грунт собирается и взвешивается. Объем лунки определяется засыпанием в нее песка с помощью воронки [1, 2, 3].

6. Метод парафинирования применяется преимущественно в зимних условиях. Образец грунта парафинируется, определяется его масса, затем этот образец погружается в воду для выявления объема парафина. По итогам измерений в дальнейшем определяются параметры грунта [1, 2, 3].

7. В радиоизотопном методе используется зондирование грунта излучением изотопов и на основании полученных данных отслеживается качество уплотнения [1, 2, 3].

Без сомнения, данные методы позволяют качественно измерить плотность грунтов, однако они имеют существенный недостаток – трудоемкость. Поэтому актуальной задачей является автоматизация процесса контроля качества уплотнения грунтов. С этой целью разрабатываются специальные устройства. Некоторые из разработанных ранее устройств представлены далее.

1. Способ непрерывного контроля качества уплотнения грунта и устройство для его осуществления [4].

Данным способом осуществляется непрерывный контроль качества уплотнения грунтовых материалов в процессе их укатки дорожными статическими катками. Процесс включает в себя измерение величины осадки грунта путем использования копирующего и рабочего органов дорожного катка: раздельно измеряется средняя угловая скорость копирующего и рабочего органов, определяется их разность. Соотношение полученной разности и средней угловой скорости позволит оценить качество уплотнения грунта. Устройство содержит копирующий и рабочий органы дорожного катка, датчик величины осадки грунта, блоки усреднения и индикации. В качестве копирующего органа используется тяговый орган дорожного катка [4].

2. Способ непрерывного контроля качества уплотнения грунта и устройство непрерывного контроля качества уплотнения грунта [5].

Принцип действия заключается в измерении угловой скорости копирующего и измерительного органов катка и определении величины параметра, характеризующего процесс уплотнения. По измеренным угловым скоростям рассчитываются их значения за фиксированный промежуток времени или участок пройденного пути, вычисляется разность полученных угловых скоростей. Отношение полученной разности к рассчитанной угловой скорости одного из органов используется в качестве параметра, характеризующего процесс уплотнения, при этом измерительным органом является рабочий орган дорожного катка [5].

Устройство непрерывного контроля качества уплотнения грунта содержит дорожный каток с рабочим органом, два тахометра, один из которых установлен на рабочем органе и блок определения контролируемого параметра, входы которого соединены с тахометрами, а выход с входом блока регистрации. Второй тахометр устанавливается на копирующем органе дорожного катка. Блок определения контролируемого параметра выполнен в виде двух элементов усреднения, блока вычитания и блока вычисления отношения [5].

Представленные выше устройства актуальны, позволяют проводить текущий контроль, однако имеют существенный недостаток – сложность устройств определяет их высокую стоимость. На базе ФГБОУ ВПО «СибАДИ» было разработано устройство [6], позволяющее контролировать процесс уплотнения грунтов путем измерения плотности от прохода к проходу. На рис. 1 представлено устройство контроля качества уплотнения грунта, на рис. 2 – схема расположения устройства на дорожном катке [6].

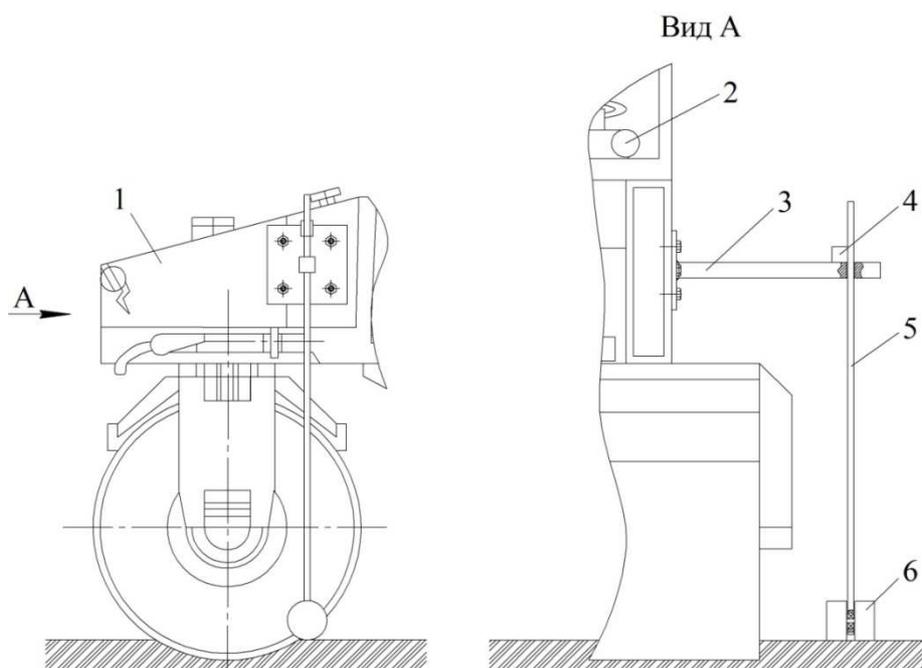


Рис. 1. Устройство контроля качества уплотнения грунта

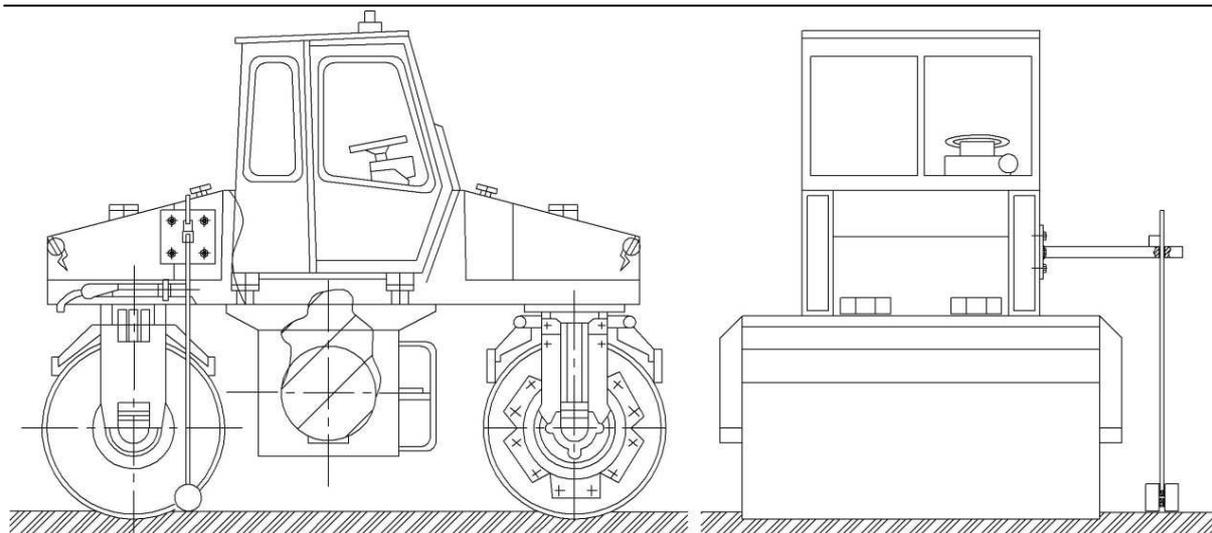


Рис. 2. Схема расположения устройства контроля качества уплотнения грунтов на дорожном катке

Представленное устройство содержит индикатор 2, установленный в кабине оператора, фиксирующее устройство 4 и ролик 6, которые закреплены на щупе 5, перемещающемся в отверстии кронштейна 3, закрепленного на катке 1. Принцип работы данного устройства основан на деформировании грунта под катком в процессе уплотнения, что приводит к проседанию катка по отношению к неуплотненному грунту рядом с катком. В процессе уплотнения щуп 5 начинает перемещение вверх в отверстии кронштейна. Перемещение щупа отслеживает фиксирующее устройство 4, которое передает данные на индикатор 2, установленный в кабине оператора. Данные о перемещениях щупа 5 могут поступать на блок управления, установленный в кабине оператора, выступающий в качестве индикатора 1 данной схемы устройства. Ролик 6, закрепленный на конце щупа 5, позволяет ему перемещаться по грунту вместе с катком. Таким образом, оператор катка при наличии начального значения плотности грунта может отслеживать ее изменение в процессе уплотнения, что позволит эффективнее использовать дорожный каток и избежать некачественного уплотнения грунта [6].

Данное устройство позволит избежать некачественного уплотнения грунтов и нерационального использования дорожных катков, имея при этом более простую конструкцию и меньшую стоимость по сравнению с аналогами.

Список литературы

1. Савельев С.В., Бурый Г.Г. Контроль качества уплотнения грунтов и инновационное устройство для его осуществления // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием). Омск: СибАДИ, 2012. С. 199 – 203.

2. Гордин В.М., Городецкий Л.В., Демин В.Ф. Технические рекомендации по технологии уплотнения грунта при обратной засыпке котлованов, траншей, пазух ТР-73-98. М.: Лаборатория дорожного НИИМосстроя, 1998.

3. Уплотнение грунтов обратных засыпок в стесненных условиях строительства / под ред. Л.М. Бобылева. М.: Стройиздат, 1981. 252 с.

4. Патент 94013644 РФ. МПК E02D1/00, G01N3/00. Способ непрерывного контроля качества уплотнения грунта и устройство для его осуществления / А.П. Лежнев, А.Д. Суворов, И.В. Сороколетов. Опубл. 10.01.1996. Бюл. № 6. 1 с.

5. Патент 2082850 РФ, МПК E01D1/00, E01C23/07. Способ непрерывного контроля качества уплотнения грунта и устройство непрерывного контроля качества уплотнения грунта / А.П. Лежнев, А.Д. Суворов, И.В. Сороколетов. Опубл. 27.06.1997. Бюл. № 6. 5 с.

6. Патент 2500855 РФ. МПК E01C23/07. Устройство непрерывного контроля качества уплотнения грунта / В.В. Михеев, С.В. Савельев, Г.Г. Бурый. Опубл. 10.12.2013. Бюл. № 34. 2 с.

Савельев Сергей Валерьевич, д-р техн. наук, доц., saveliev_sergval@mail.ru, Россия, Омск, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия,

Бурый Григорий Геннадьевич, преподаватель, buryu1989@bk.ru, Россия, Омск, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия,

Потеряев Илья Константинович, канд. техн. наук, доц., poteryaev_ik@mail.ru, Россия, Омск, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия,

Белодед Александр Сергеевич, магистрант, kaf_edm@sibadi.org, Россия, Омск, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия

**APPLICATIONS OF INNOVATIVE PRODUCT QUALITY CONTROL
SOIL COMPACTION ROAD-BUILDING MACHINES – ROLLER**

S.V. Saveliev, G.G. Buryu, I.K. Poteryaev, A.S. Beloded

The compaction quality control of innovative device rollers as well as its advantages in comparison with analogues are considered. Traditional methods of quality control soil compaction, as well as some seal of quality control devices soil are presented. Drawbacks of existing methods and quality control devices soil compaction are described. The relevance and benefits of innovation and consideration of compaction of soil quality monitoring devices are shown.

Key words: seal, road roller, soil, equipment, deformation

Saveliev Sergey Valerievich, doctor of technical science, docent, saveliev_sergval@mail.ru, Russian Federation, Omsk, Siberian State Automobile and Highway Academy,

Buryy Grigoriy Gennadievich, senior lecturer, buryy1989@bk.ru, Russian Federation, Omsk, Siberian State Automobile and Highway Academy,

Poteryaev Ilya Konstantinovich, candidate of technical science, docent, poteryaev_ik@mail.ru, Russian Federation, Omsk, Siberian State Automobile and Highway Academy,

Beloded Alexander Sergeevich, master, kaf_edm@sibadi.org, Russian Federation, Omsk, Siberian State Automobile and Highway Academy

УДК 628.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ FMEA ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Д.Б. Белов, Е.В. Масенков

Рассмотрена методология «Анализ видов и последствий потенциальных отказов» в качестве метода расчета одного из единичных показателей качества системы централизованного водоснабжения. Преобразованы таблицы определения баллов значимости, частоты и оценки обнаружения отказов в соответствии с оцениваемой системой. Проведен расчет единичного показателя качества «Безопасность водоснабжения».

Ключевые слова: водоснабжение, единичный показатель качества, методика расчета, безопасность, отказ.

Методология FMEA (Failure Mode and Effects Analysis – анализ характера и последствий отказов) была разработана и введена в действие в 1949 году в качестве стандарта военной промышленности США для определения и анализа возникновения возможных отказов изделия, процесса, системы [1]. Позже были разработаны отечественные стандарты [2], [3] и [4], включающие данную методологию.

Данная методология позволяет проводить анализ процесса, системы на раннем этапе, что сокращает дальнейшие расходы по исправлению дефектов, так как согласно функциональной зависимости затрат на управление качеством [5], затраты на оценку и предупреждение отказов минимальны и на порядок меньше затрат на устранение неисправностей.

Методологию анализа видов и последствий потенциальных отказов целесообразно использовать для оценки единичного показателя качества «Безопасность системы водоснабжения». Следует отметить, что подобный подход уже предлагался в работе [6] применительно к оценке безопасности системы газоснабжения.

В соответствии с методикой [4] для каждого вида отказа нужно определить способ обнаружения отказа и средства диагностики отказа. При анализе отказов процесса определяют, с какой вероятностью и где недостатки и несоответствия процесса могут быть идентифицированы (например, оператором при статистическом управлении процессом, в процессе контроля качества или на более поздних этапах процесса) [4].

Методологию FMEA применяют для выявления влияния используемых мер безопасности на предотвращение или уменьшение последствий отказа в конкретных условиях. При этом применяют следующие меры безопасности [4]:

- 1) резервные объекты для замены отказавших элементов системы (резервные насосы, дублирующие магистральные сети водоснабжения и т.д.);
- 2) альтернативные средства (альтернативная схема водоснабжения, закольцованность централизованного водоснабжения города и пр);
- 3) диспетчеризация, мониторинг отказов и сигнальные устройства;
- 4) любые другие меры безопасности для предотвращения отказов или уменьшения ущерба.

Оценку приоритетности риска будем проводить в соответствии с методикой, изложенной в стандартах [2] и [4].

Соответственно приоритетное число риска RPN вычисляют по формуле

$$RPN = S \cdot O \cdot D, \quad (1)$$

где S – значение тяжести последствий, т.е. степени влияния отказа на систему или пользователя; O – оценка вероятности появления отказа для заданного периода времени; D – оценка вероятности обнаружения, идентификации и устранения отказа до появления последствий для системы.

Баллы S , O , D выбираются экспертами по табл. 1 – 3, аналогично приведенным в [4] и модифицированным применительно к оцениваемой системе.

Таблица 1

Тяжесть последствий вида отказов

Тяжесть последствий	Критерий	Ранг S
Отсутствует	Нет последствий	1
Очень незначительная	Качество водоснабжения не соответствует требованиям. Дефект замечают требовательные пользователи (менее 25 %)	2
Незначительная	Качество водоснабжения не соответствует требованиям. Дефект замечают 50 % пользователей	3
Очень низкая	Качество водоснабжения не соответствует требованиям. Дефект замечают большинство пользователей (более 75 %)	4
Низкая	Система водоснабжения находится в работоспособном состоянии, но работает на ослабленном уровне, малоэффективна. Пользователь испытывает некоторую неудовлетворенность	5
Умеренная	Система водоснабжения работоспособна, но давление воды в водопроводе понижено. Клиент испытывает дискомфорт	6
Высокая	Система водоснабжения работоспособна, но на сниженном уровне эффективности. Клиент очень неудовлетворен	7
Очень высокая	Система водоснабжения неработоспособна, подача воды производиться не может (потеря основной функции)	8
Опасная с предупреждением об опасности	Очень высокий уровень тяжести последствий, когда потенциальный вид отказа влияет на безопасность и/или вызывает несоответствие обязательным требованиям безопасности с предупреждением об опасности	9
Опасная без предупреждения об опасности	Очень высокий уровень тяжести последствий, когда потенциальный вид отказа влияет на безопасность и/или вызывает несоответствие обязательным требованиям без предупреждения об опасности	10

Ранг тяжести последствий назначают на основе влияния последствий отказа на систему водоснабжения в целом, на её безопасность и выполнение требований.

Определение вероятности появления отказов связано с исследуемым периодом времени (сроком службы). Вероятность отказов может быть вычислена для компонентов системы и их видов отказов на основе соответствующих интенсивностей отказов для ожидаемых условий эксплуатации или оценка может быть назначена экспертным методом в случае, если применение вычислительных методов не представляется возможным.

Оценка вероятности обнаружения отказа – это вероятность того, что у серии действий по контролю процесса есть возможность обнаружения и изоляции отказа прежде, чем он повлияет на последующие процессы или на готовую продукцию [4].

Таблица 2

Частота и вероятность появления отказов

Характеристика появления вида отказа	Ранг <i>O</i>	Частота появления отказа	Вероятность
Очень низкая – отказ маловероятен	1	< 0,010 на 1000 объектов	$\leq 10^{-5}$
Низкая – относительно мало отказов	2	0,1 на 1000 объектов	10^{-4}
	3	0,5 на 1000 объектов	$5 \cdot 10^{-4}$
Умеренная – отказы возможны	4	1 на 1000 объектов	10^{-3}
	5	2 на 1000 объектов	$2 \cdot 10^{-3}$
	6	5 на 1000 объектов	$5 \cdot 10^{-3}$
Высокая – наличие повторных отказов	7	10 на 1000 объектов	10^{-2}
	8	20 на 1000 объектов	$2 \cdot 10^{-2}$
Очень высокая – отказ почти неизбежен	9	50 на 1000 объектов	$5 \cdot 10^{-2}$
	10	>100 на объектов	$\geq 10^{-1}$

Таблица 3

Оценка обнаружения отказов

Характеристика обнаружения	Критерий – возможность обнаружения вида отказов на основе предусмотренных операций контроля	Ранг <i>D</i>
Практически стопроцентно	Предусмотренный проектом контроль почти всегда обнаруживает потенциальную причину/механизм и следующий вид отказа	1
Очень хорошее	Очень высок шанс, что предусмотренный проектом контроль обнаружит потенциальную причину/механизм и последующий вид отказа	2
Хорошее	Высокий шанс, что предусмотренный проектом контроль обнаружит потенциальную причину/механизм и последующий вид отказа	3
Умеренно хорошее	Умеренно высокий шанс, что предусмотренный проектом контроль обнаружит потенциальную причину/механизм и последующий вид отказа	4
Умеренное	Умеренный шанс, что предусмотренный проектом контроль обнаружит потенциальную причину/механизм и последующий вид отказа	5
Слабое	Низкий шанс, что предусмотренный проектом контроль обнаружит потенциальную причину/механизм и последующий вид отказа	6
Очень слабое	Очень низкий шанс, что предусмотренный проектом контроль обнаружит потенциальную причину/механизм и последующий вид отказа	7

Характеристика обнаружения	Критерий – возможность обнаружения вида отказов на основе предусмотренных операций контроля	Ранг D
Плохое	Маловероятно, что предусмотренный проектом контроль обнаружит потенциальную причину/механизм и последующий вид отказа	8
Очень плохое	Почти невероятно, что предусмотренный проектом контроль обнаружит потенциальную причину/механизм и последующий вид отказа	9
Практически невозможно	Предусмотренный проектом контроль не может обнаружить потенциальную причину/механизм и последующий вид отказа или контроль не предусмотрен	10

Для приоритетного числа риска должна быть заранее установлена критическая граница в пределах от 100 до 125 [2], она назначается разработчиками системы (в данном случае это система централизованного водоснабжения). Общепринятой величиной [2] является значение $RPN_{zp} = 125$ но это значение может быть изменено в меньшую сторону при повышении требований к надёжности системы.

RPN позволяет оценить степень риска возникновения потенциальных несоответствий α . Учитывая, что максимально возможное число RPN соответствует наиболее критической ситуации, при которой $S_{max} = O_{max} = D_{max} = 10$, степень риска α можно определить как отношение допустимого RPN_{zp} к максимально возможному RPN_{max} :

$$\alpha = \frac{RPN_{zp}}{RPN_{max}} = \frac{RPN_{zp}}{S_{max} \cdot O_{max} \cdot D_{max}} = \frac{RPN_{zp}}{1000}. \quad (2)$$

При значении установленной критической границы $RPN_{zp} = 125$, степень риска будет $\alpha = 0,125$, т.е. риск довольно высок, и эта величина требует обсуждения специалистов.

Принимая условие, что «чем меньше расчетное значение RPN , определенное по формуле (1), тем лучше», формируем относительную балльную оценку Q как

$$Q = 1 - \frac{RPN}{RPN_{max}}. \quad (4)$$

При $RPN_{zp} > RPN$ величина Q не рассчитывается, а используется «правило Вето», согласно которому показатель качества приравнивается к нулю и принимаются меры для уменьшения величины RPN . Относительная балльная оценка должна удовлетворять неравенству

$$Q \leq 1. \quad (5)$$

Вычислим по формулам (1) и (4) значение балльной оценки Q единичного показателя качества «Безопасность системы водоснабжения» определив значения баллов S , O , D по табл. 1 – 3. Балл значимости S определяется экспертно по типовой шкале (см. табл. 1) в зависимости от последствий отказов. Если последствий несколько и значимости их разные, то выбирается максимальное значение балла значимости. Для системы водоснабжения он будет $S = 4$.

Для оценки частоты появления отказов воспользуемся статистическими данными по подобным процессам. Для рассматриваемой системы $O = 4$.

Обнаружение отказов оценивают с учетом того, что применяемые средства контроля обнаружат признаки несоответствия, последствия или причины прежде, чем эти признаки будут замечены потребителем. Для системы водоснабжения балл обнаружения отказов будет $D = 5$.

Вычислим по формуле (1) приоритетное число риска (RPN):

$$RPN = S \cdot O \cdot D = 4 \cdot 4 \cdot 5 = 80.$$

Полученная величина $RPN = 80$ меньше критической границы $RPN_{cp} = 125$, что позволяет рассчитать значение балльной оценки Q :

$$Q = 1 - \frac{RPN}{RPN_{\max}} = 1 - \frac{80}{10 \cdot 10 \cdot 10} = 0,92.$$

Полученное в результате расчетов значение балльной оценки $Q = 0,92$ является количественной оценкой комплексного риска несоответствия, включающего в себя значимость возможных последствий несоответствия, вероятности возникновения несоответствия и вероятность обнаружения несоответствия.

Список литературы

1. Saemisch M.K., Buchanan M.S. Spacecraft Survivability Engineering: A Lockheed Martin Innovation Enhancing Traditional Hazard Control Approaches, // 2 International Association for the Advancement of Space Safety conference. 14 May 2007.
2. ГОСТ Р 51814.2-2001. Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов.
3. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.
4. ГОСТ Р 51901.12-2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов.
5. ГОСТ Р ИСО 9004-2001. Системы менеджмента качества. Рекомендации по улучшению деятельности.

6. Игнатъев А.А. Управление процессом газоснабжения в системе менеджмента качества территориальных организаций-поставщиков: дис.... канд. техн. наук. Тула, 2013. 171 с.

7. Масенков Е.В., Белов Д.Б. Показатели качества системы коммунального водоснабжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 12. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 257 с.

Белов Дмитрий Борисович, канд. техн. наук, доц., imsbelov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Масенков Евгений Вячеславович, асп., masenkov-evgeny@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

USE OF FMEA METHODOLOGY FOR ASSESSING THE QUALITY OF CENTRALIZED WATER SUPPLY SYSTEM

D.B. Belov, E.V. Masenkov

The methodology "Failure mode, effects and criticality analysis" as the method of calculating one of the individual quality of the centralized water supply system. The converted table definitions points to the importance, frequency and evaluation of failure detection in accordance with water supply system. The calculation of a single indicator of the quality of "Safety of water supply system".

Key words: water, singular quality index, calculation methods, safety, failure.

Belov Dmitriy Borisovich, candidate of technical sciences, docent, imsbelov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Masenkov Evgenij Vjacheslavovich, postgraduate, masenkov-evgeny@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВОЙСТВ ПЛАСТОВОЙ НЕФТИ ВАНКОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Н.Ф. Орловская, И.Н. Рубцов

Показано, что неустойчивые породы, вынос в ствол скважины взвешенных частиц глины и песка вместе с возрастающей обводненностью добываемой нефти на ряде скважин Ванкорского месторождения приводят к образованию стойких водонефтяных эмульсий, проблемам при эксплуатации скважинного оборудования и транспортировке нефти. Для получения и накопления сведений об условиях формирования нанокolloидов нефти в пласте предлагается использовать разработанный нами программно-аппаратный комплекс по анализу и передаче данных через сеть интернет.

Ключевые слова: нефть Ванкорского месторождения, нанокolloиды, формирование стойких водонефтяных эмульсий, программно-аппаратный комплекс, анализ и передача данных через сеть Интернет.

Исследования, проводившиеся на протяжении последних лет, показали, что природные нефти относятся к наноматериалам, так как они содержат природные нанообъекты (нанофазы), эволюция которых описывается универсальными закономерностями (фазовыми диаграммами) [1]. Это делает возможным применение к нефтям нанотехнологий молекулярной самоорганизации, основанных на подходах супрамолекулярной химии. Такие подходы основаны на управлении структурой фаз нанообъектов путем целенаправленных изменений внешних условий и состава среды. Основным интерес представляют ассоциативные нанокolloиды асфальтенов, структурные фазовые превращения которых оказывают наиболее сильное влияние на макроскопические, эксплуатационно-значимые свойства добываемого сырья. Результаты лабораторного изучения добытых нефтей при атмосферном давлении позволили построить диаграмму состояния нанофаз в координатах: температура среды – содержание асфальтенов, схема которой показана на рис. 1 [2].

Вязкость, структурные свойства и характер межмолекулярных взаимодействий в водонефтяных эмульсиях определяются величиной температуры формирования этих жидких сред. Формирование при «критических» температурах, близких к 36...38 °С, инициирует структурный фазовый переход, ведущий к изменению размеров и активности молекулярных агрегатов асфальтенов. Эти агрегаты служат связующим материалом в пространственных надмолекулярных структурах, содержащих микрокристаллы парафинов. Долговременная (до месяцев) «память» об условиях формирования эмульсий обусловлена прочностью пространственных структур, содержащих не только водородные, но и ковалентные связи.

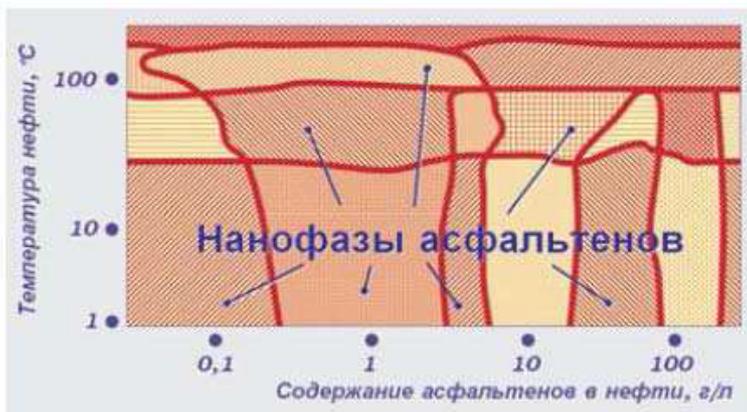


Рис. 1. Диаграмма состояния асфальтенов нефти

Действие, оказываемое асфальтенами, определяется, в первую очередь, их способностью к самоассоциации. Наилучшую стабилизацию эмульсий наблюдали при наличии в жидкой среде крупных молекулярных агрегатов асфальтенов. Например, было обнаружено, что в битумных эмульсиях капли воды стабилизированы благодаря отталкиванию между адсорбированными на поверхности капель «монослоями» агрегатов асфальтенов диаметром 8...10 нм. Аналогично, на основании измерений вязкости нефтяных эмульсий был сделан вывод, что стабилизация капель воды асфальтенами осуществляется в результате адсорбции молекулярных агрегатов размером 10 нм. В свою очередь, молекулярные агрегаты асфальтенов стабилизируются защитными слоями сольватированных молекул смол. При отсутствии асфальтенов парафины не оказывают воздействия на структурные свойства и стабильность нефтяных и битумных эмульсий. В эмульсиях, не содержащих асфальтенов, микрокристаллы парафинов являются гидрофобными, полностью смачиваются нефтью и равномерно распределены по объему нефтяной фазы. Особая роль молекулярных агрегатов асфальтенов состоит в том, что они адсорбируются на поверхностях кристаллов парафинов, изменяя характер их смачивания. Приобретая гидрофильные свойства, кристаллы парафинов перемещаются к поверхности капель воды, формируя прочные «оболочки» вокруг этих капель [1, 2].

В предыдущей работе [3] на основе физико-химических характеристик ванкорской нефти, содержания в ней смол и асфальтенов, температуры в пласте, содержания воды в образуемой ею устойчивой водонефтяной эмульсии определили, что нанокolloиды асфальтенов ванкорской нефти имеют размер 2...10 нм, и предложили путь разрушения стойких водонефтяных эмульсий, образуемых ванкорской нефтью, в которых капельки воды имеют «бронирующие» оболочки, содержащие смолы и механические примеси [3].

Нет сведений о фазовом поведении нанокolloидов в «живой» нефти, в реальных пластовых условиях – это потребует более сложных и дорогостоящих экспериментов. Однако такие данные помогли бы выбрать мероприятия для влияния на коллоидное состояние водонефтяных эмульсий и получение сырой нефти более высокого качества.

Для этого необходимы базы данных условий (температура, давление) и сведения о нефти (плотность, вязкость, механические примеси) в пласте.

Предлагается программно-аппаратный комплекс для анализа условий и поведения нефти в пласте. Для получения данных и их оперативного анализа, а также визуализации предлагаем использовать установленное на буровых установках измерительное оборудование и разработанный авторами программно-аппаратный комплекс для последующей обработки. Данный комплекс позволит получать данные с датчиков, проводить их резервирование и передавать по доступным каналам связи (таким, как wi-fi, сотовая сеть или прямая передача на спутник) на специально созданный сервер в сети Интернет, где можно оперативно получить данные и провести анализ.

Разработанный комплекс состоит из сети проводных и беспроводных модулей сопряжения с установленным оборудованием, независимых датчиков и основного блока – даталоггера, координирующего действие всех приборов. Алгоритм работы позволяет проводить многоступенчатое резервирование данных (в блоке сопряжения, в даталоггере и на сервере в сети Интернет). Таким образом, даже при выходе из строя центрального блока данные будут храниться автономно на каждом блоке сопряжения, откуда их можно будет впоследствии получить.

Для удобства инсталляции приборов на технологическом оборудовании возможно как проводное, так и беспроводное подключение устройств.

Структурная схема приборов представлена на рис. 2.

Для контроля точности времени и сохранности инсталляции даталоггер размещен в герметичном корпусе и оборудован приемниками сигналов ГНСС Глонасс и GPS. В качестве протокола проводных датчиков используется RS-485, а для беспроводного был выбран стандарт ZigBee на частоте 2,4 ГГц.

Структурная схема даталоггера представлена на рис. 3.

Учитывая, что прибор будет использоваться в отдаленных районах, где доступ к сетям передачи данных ограничен, предлагается использовать прямую передачу на спутниковую группировку IRIDIUM, позволяющую передавать данные с уверенным качеством на всей территории России и большей части мира (рис. 4).

При получении первоначальных «сырых» данных даталоггер проводит их проверку на наличие ошибок и передаёт на специально созданный сервер в сети Интернет для последующей обработки.

После этого оператор из любой точки мира через сеть Интернет может получить к ним доступ и даже удаленно изменять режим работы.

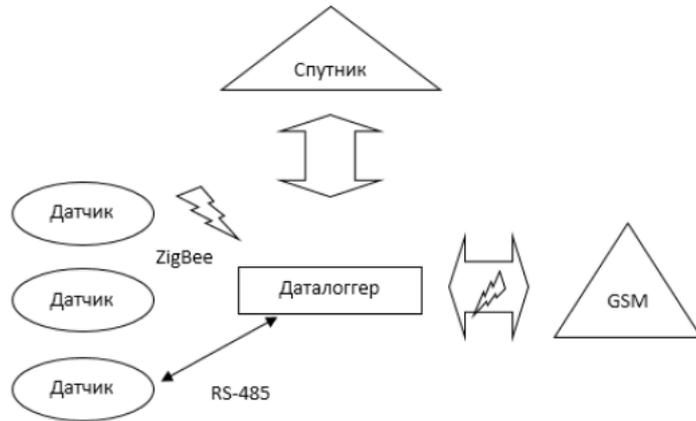


Рис. 2. Схема работы аппаратного комплекса

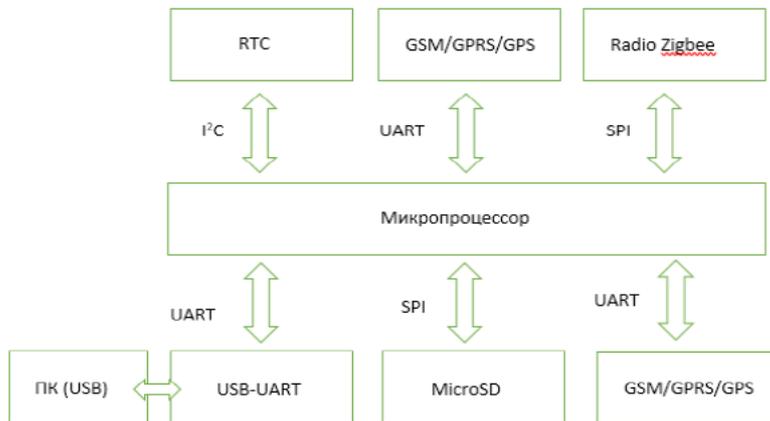


Рис. 3. Структурная схема даталоггера



The map depicts Iridium's aspirations of coverage, but does not represent a guarantee of service. The availability of service at the edge of the coverage areas fluctuates depending on various conditions. Please note the Iridium service is not available in North Korea.

Рис. 4. Карта покрытия спутниковой группировки Iridium

Структура комплекса позволяет ему гибко настраиваться на решение поставленных задач и легко подключать новые датчики при необходимости дополнительного анализа.

Для обработки данных, поступающих на веб-сервер, были разработаны приложения, обеспечивающие получение данных, их проверку и сохранение в базе данных MySQL. Данные приложения также проводят автоматическое резервирование данных для обеспечения сохранности в случае сбоя веб-сервера.

Отдельная группа приложений была создана для работы с клиентским интерфейсом пользователя, позволяющим проводить работу с данными, их визуализацию, экспресс-анализ, а также изменять режимы работы комплекса.

Для работы с прибором была разработана клиентская оболочка, доступная при переходе на специально созданный сайт.

Веб-сайт разработан с возможностью адаптивного просмотра, т.е. в зависимости от устройства, с которого пользователь заходит на сайт (компьютер, планшет или телефон), сайт будет отображаться в определенном виде, удовлетворяющем требованиям удобства использования и читабельности текстов.

Визуализация данных производится в интерактивном режиме, вновь поступающие данные мгновенно отображаются на экране пользователя.

Для обеспечения возможности первоначальной фильтрации данных применяются базовые алгоритмы обработки данных. Приложения, обеспечивающие фильтрацию данных, выполняются на серверной части по следующим причинам: снижение нагрузки на аппаратную часть даталоггера для обеспечения меньшего энергопотребления, возможность работать с параметрами фильтрации в режиме реального времени, многоуровневое копирование сырых и обработанных данных на веб-сервере без риска их потерять и при необходимости восстановить, а также гибкие возможности экспорта данных.

В настоящее время на сервере используются следующие возможности фильтрации: устранение шумов и пиков в массивах данных, фильтр скользящего среднего, среднеквадратичное отклонение.

Также веб-сервер может быть настроен на экстренное оповещение по электронной почте или sms о наступлении критических параметров, требующих реагирования на месте.

Выводы

Использование сведений о влиянии состояния наноразмерных фаз асфальтенов и смол нефти на ее эксплуатационные свойства при разработке нефтегазовых месторождений позволит планировать мероприятия по улучшению внутренней структуры добываемой нефти и разрушению эмульсий пластовой воды в ней.

Для получения и накопления сведений о фазовом поведении нанокolloидов нефти в реальных пластовых условиях предлагается использовать разработанный авторами программно-аппаратный комплекс по анализу и передаче данных через сеть Интернет.

Список литературы

1. Евдокимов И.Н., Елисеев Н.Ю. Влияние асфальтенов на термические свойства нефтяных и битумных эмульсий // Химия и технология топлив и масел. 2002. № 6. С. 26 – 29.
2. Евдокимов И.Н., Лосев А.П. Нефтегазовые нанотехнологии с вовлечением природных нанобъектов добываемого сырья – на пути к «нанозкологии» нефтедобычи // Промышленная безопасность и экология. 2009. № 10(43). С. 8 – 11.
3. Применение растворителей и ПАВ для удаления асфальтеносмолопарафиновых отложений (АСПО) с технологического оборудования в условиях Ванкорского месторождения / Н.Д. Булчаев, И.Н. Рубцов, Н.Ф. Орловская, Ю.Н. Безбородов // Бурение и нефть. 2015. № 7-8. С. 54 – 57.

Орловская Нина Федоровна, д-р техн. наук, проф., togsming@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа,

Рубцов Илья Николаевич, асп., 3507777@gmail.com, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THE PROPERTIES OF VANKOR OIL

N.F. Orlovskaya, I.N. Rubtsov

Presence of suspended clay and sand particles, water cut of produced oil in several wells of Vankor field lead to the formation of persistent oil-water emulsions. The existence of tar and mechanical impurities provides stability of the water drops. It leads to problems in the operation of downhole equipment and oil transport. For receiving and accumulation information about the conditions of formation of colloids of oil is proposed to use the developed hardware system of analysis and data transmission via the Internet.

Key words: Vankor field oil, colloids, formation of persistent oil-water emulsions oxidation, hardware system, analysis and data transmission via the Internet.

Orlovskaya Nina Fedorovna, doctor of technical sciences, professor, togsming@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas,

Rubtsov Ilya Nikolaevich, postgraduate, 3507777@gmail.com, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ «ЭЛЕКТРОПРИВОД – ЗАПОРНАЯ АРМАТУРА» С ПОЗИЦИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Е.В. Плахотникова

Приводится обобщение результатов комплексного исследования систем «электропривод – запорная арматура». Представлена функция зависимости суммарной энергии, расходуемой на обеспечение герметичности запорного органа арматуры, от жесткости. Установлена точка экстремума функции, в которой требуется минимальный расход энергии. Приведенные результаты раскрывают новое направление совершенствования систем и повышения их конкурентоспособности.

Ключевые слова: электропривод, запорная арматура, баланс энергий, баланс жесткости.

Комплексное исследование электропривода с двухсторонней муфтой регулирования крутящего момента и запорной арматуры с прямолинейным перемещением запорного органа в рамках единой системы позволило установить общие принципы распределения энергий между элементами при выполнении наиболее ответственного периода рабочего цикла «открыто – закрыто» – обеспечение герметичности [3].

Особенность рассматриваемых систем заключается в том, что энергия электродвигателя привода распределяется в процессе обеспечения герметичности системы на два потока [4]. Первый поток преобразуется в потенциальную энергию упруго деформированной запорной арматуры, обеспечивая герметичность соединения запорного органа арматуры с посадочным местом, второй поток – в потенциальную энергию упруго деформированной пружины, используемой в системе для выполнения силоизмерительной функции, необходимой для точности позиционирования запорного органа арматуры (рис. 1).

На схеме (рис. 1) приведены следующие элементы запорной арматуры и привода: 1 – статор электродвигателя; 2 – ротор электродвигателя; 3 – подпружиненный червяк с возможностью осевого перемещения; 5 – зубчатые колеса редуктора; 6 – пружина; 7 – моментный выключатель («закрытия»); 8 – ходовая гайка; 9 – сальник; 10 – запорный орган; 15 – седло посадки запорного органа. Часть запорной арматуры, включающая элементы, испытывающие упругие деформации и определяющие её жесткость, представлены на схеме условно в виде пружины 11.

Суммарная энергия E_{3A} , расходуемая на обеспечение герметичности запорной арматуры Δi , определяется уравнением

$$E_{3A} = E_{3A}^H + E_{3A}^{om} + E_{3A}^{un} \quad [\text{Дж}], \quad (1)$$

лезного действия червячной передачи с учетом потерь при трении; η_2 – коэффициент полезного действия винтовой передачи арматуры с учетом потерь при трении.

Из уравнения (3) следует, что приращение сил $P_{\text{при}}$, $P_{\text{закі}}$ в условиях равновесия системы происходит пропорционально постоянному коэффициенту, зависящему от технических характеристик как электропривода, так и запорной арматуры:

$$C_{\text{сист.}} = \frac{P_{\text{при}}}{P_{\text{закі}}} = \frac{P_{\text{х.в.}}}{2\pi \cdot r_0} \cdot \frac{\eta_1}{\eta_2} = L \cdot \frac{\eta_1}{r_0} \rightarrow \text{const}, \quad (4)$$

где $C_{\text{сист.}}$ – постоянный коэффициент, определяющий соотношение сил в условиях равновесия системы; L – плечо крутящего момента в трапецеидальной резьбе.

Функции приращения сил $P_{\text{закі}}(\Delta_i)$, $P_{\text{при}}(X_i)$ (см. рис.1), где Δ_i соответствуют суммарной деформации подсистемы запорной арматуры, а X_i – деформации силоизмерительной пружины, в соответствии с законом Гука можно описать линейными зависимостями:

$$P_{\text{закі}} = C_{\text{кл}} \cdot \Delta_i \text{ [Н]}, \quad (5)$$

где $C_{\text{кл}}$ – жёсткость запорной арматуры;

$$P_{\text{при}} = k_{\text{пр}} \cdot X_i \text{ [Н]}, \quad (6)$$

где $k_{\text{пр}}$ – жёсткость силоизмерительной пружины.

Величины энергий $E_{\text{ЗА}}$ и $E_{\text{ПР}}$ можно определить как площадь соответствующих треугольников (см. рис.1):

$$E_{\text{ЗА}} = \frac{P_{\text{закі}} \cdot \Delta_i}{2} \text{ [Дж]}, \quad (7)$$

$$E_{\text{ПР}} = \frac{P_{\text{при}} \cdot X_i}{2} \text{ [Дж]}. \quad (8)$$

Используя выражения (5), (6), уравнения (7), (8) можно привести к виду

$$E_{\text{ЗА}} = \frac{P_{\text{закі}}^2}{2 \cdot C_{\text{кл}}} \text{ [Дж]}, \quad (9)$$

$$E_{\text{ПР}} = \frac{P_{\text{при}}^2}{2 \cdot k_{\text{пр}}} \text{ [Дж]}. \quad (10)$$

Полученные уравнения (9), (10) с учетом выражения (4) позволяют определить соотношение энергий в системе «электропривод – запорная арматура»:

$$K_c = \frac{E_{\text{ПР}}}{E_{\text{ЗА}}} = \frac{C_{\text{кл}}}{k_{\text{пр}}} \cdot C_{\text{сист.}}^2. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что распределение энергий в системе «электропривод – запорная арматура» происходит пропорционально постоянному для отдельно взятой системы коэффициенту ($K_c \rightarrow \text{const}$), значение которого зависит от соотношения жесткостей запорной арматуры $C_{\text{кл}}$ и силоизмерительной пружины $k_{\text{пр}}$, а также от постоянного коэффициента, определяющего соотношение сил в условиях равновесия системы $C_{\text{сист.}}$.

Совмещение электропривода и запорной арматуры будет являться эффективным, если большая часть энергии, аккумулируемой в системе, будет расходоваться на обеспечение герметичности трубопровода. Тогда значение коэффициента будет находиться в интервале от 0 до 1.

В граничном положении при $K_c=1$ энергия будет распределяться в равных долях на обеспечение герметичности и выполнение силоизмерительной функции, т.е. системе потребуется удвоенное количество энергии.

При $K_c>1$ большая часть энергии будет расходоваться на выполнение силоизмерительной функции системы или демпфироваться силоизмерительной пружиной, что указывает на неэффективность системы.

Зависимость суммарной энергии, расходуемой в системе на обеспечение герметичности, от жесткости запорной арматуры $\Sigma E(C_{кл})$ можно определить выражением

$$\Sigma E(C_{кл}) = (K_c + 1) \cdot \left[\left(\sqrt{\frac{1}{2 \cdot C_{кл}}} \cdot P_{зак} + \sqrt{\frac{C_{кл}}{2}} \cdot P_{х.в.} \cdot \frac{n_{э.д.}}{i} \cdot t_{от} \right)^2 + \frac{E_{кин}}{K_c + 1} \right] - E_{ПП}^0 \quad (12)$$

В уравнении (12) квадрат суммы определяет потенциальные энергии упруго деформированной запорной арматуры при работающем электродвигателе. Здесь $P_{зак}$ – сила, действующая в запорной арматуре в момент срабатывания моментного выключателя; $n_{э.д.}$ – частота вращения выходного вала электродвигателя; i – передаточное отношение редуктора; $t_{от}$ – время запаздывания системы управления при отключении электродвигателя.

Второе слагаемое в квадратных скобках определяет долю кинетической энергии, воспринимаемой запорной арматурой после отключения электродвигателя. Величину полной кинетической энергии $E_{кин}$ можно найти из выражения

$$E_{кин} = \frac{J_1 \cdot \omega^2}{2} + \frac{J_2 \cdot \omega^2}{2} + \frac{J_3 \cdot \omega^2}{2} + \frac{m_q \cdot V_q^2}{2} \quad [\text{Дж}], \quad (13)$$

где J_1 – момент инерции ротора двигателя; J_2 – момент инерции вала червяка; J_3 – момент инерции червяка; m_q – масса червяка; ω – угловая скорость выходного вала электродвигателя; V_q – осевая скорость червяка в момент отключения электродвигателя.

Значение $E_{ПП}^0$ в уравнении (12) определяет величину потенциальной энергии предварительного сжатия пружины в момент пуска системы:

$$E_{ПП}^0 = \frac{P_{пр0}^2}{2 \cdot k_{пр}} \quad [\text{Дж}], \quad (14)$$

где $P_{пр0}$ – начальная сила сжатия пружины.

Выражение (12) позволяет оценить весомость каждой составляющей энергии, аккумулируемых в системе при реализации цикла «открыто - закрыто», и установить сочетание жесткостей запорной арматуры и силоизмерительной пружины, при которых расход энергии будет минимальным.

Графическая интерпретация уравнения (12) представлена на рис. 2. Левый график (рис. 2, а) поясняет общий вид функций при вариации жесткости запорной арматуры и положение точки экстремума функции ΣE_{min} .

Правые графики (рис. 2, б) показывают чувствительность функции $\Sigma E(C_{кл})$ к изменению параметров настройки системы за счёт учёта при проектировании времени запаздывания системы и кинетической энергии системы [1, 2].

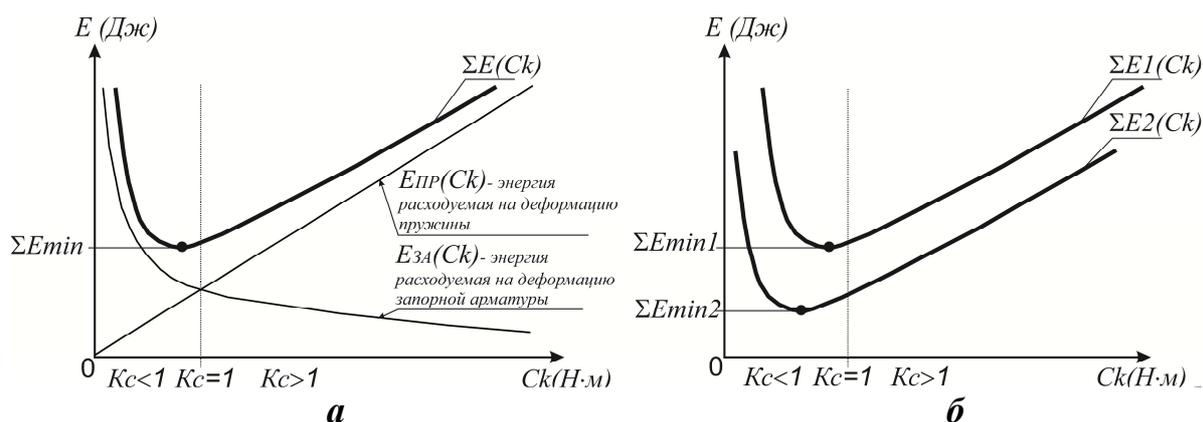


Рис. 2. Зависимость суммарной энергии, расходуемой в системе «электропривод – запорная арматура», от жесткости запорной арматуры

Анализ графиков (рис. 2) позволяет утверждать, что проектирование систем без анализа баланса жесткости запорной арматуры и силоизмерительной пружины может не только снижать техническую эффективность систем ($Kc > 1$), но, требуя повышенного расхода энергии, неоправданно повышать их энергопотребление.

Учитывая кратковременность работы систем, следует понимать, что вопрос энергопотребления в данном случае носит не столько экономический характер, сколько определяет надежность функционирования системы.

С увеличением жесткости запорной арматуры, что в настоящее время является приоритетным направлением снижения влияния динамических нагрузок под действием электропривода [5], снижается доля воспринимаемой системой энергии.

Абсолютно жесткое тело не только не передает, но и не аккумулирует энергию, что приводит к ее рассеиванию в системе, являясь причиной избыточных напряжений и поломок её элементов.

Для пояснения в таблице приведены результаты физического эксперимента, направленного на исследования изменения крутящего момента на выходном валу электропривода при снижении жесткости запорной арматуры.

При проведении эксперимента жесткость системы (эксперимент №2) была снижена путем расположения между запорной арматурой и электроприводом дополнительного элемента, увеличивающего податливость системы (рис. 3).

Результаты экспериментального исследования систем «электропривод – запорная арматура» при пониженной жесткости запорной арматуры

№ опыта	Параметры настройки электропривода на отключение	Среднее значение крутящего момента, фиксируемое при полной остановке системы по результатам 8 экспериментов
Эксперимент №1 Система с номинальной жесткостью	40 Н·м	81 Н·м
Эксперимент №2 Система с пониженной жесткостью		93 Н·м

На рис. 3 представлены схема установки переходника в системе «электропривод – запорная арматура» (рис. 3, а), графики, поясняющие причины приращения силы и соответственно момента силы, при проведении эксперимента №1 (рис. 3. б) и эксперимента №2 (рис. 3.с). Здесь $\Delta_{от}$ – деформации запорной арматуры за время запаздывания, значения, равные для обеих систем, используемых в экспериментах.

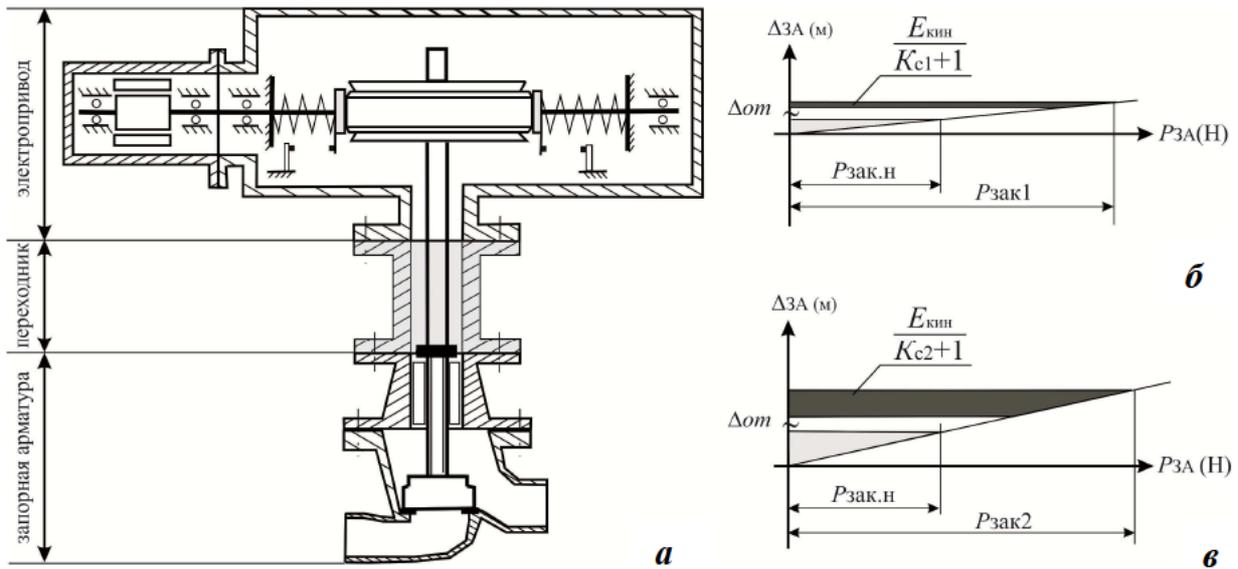


Рис. 3. Графическое пояснение опыта измерения крутящего момента при понижении жесткости системы

Проведенные исследования показывают, что за счет различных вариаций жесткости запорной арматуры и силоизмерительной пружины можно решать разнообразные технические задачи, направленные на повышение технической эффективности систем, снижение их мощностных характеристик либо оптимизации всех параметров с целью повышения общего технического уровня конечного продукта.

Обобщая полученные результаты, следует отметить, что для повышения технического совершенства и конкурентоспособности систем «электропривод – запорная арматура» обязательным условием является обеспечение как баланса энергий, так и баланса жесткости. Жесткость элементов системы является в настоящее время неиспользуемым в проектных работах дополнительным управляющим параметром, учет которого позволит обеспечивать эффективную функциональную совместимость элементов, корректно воспринимать аккумулируемую в системе энергию, минимизировать опасность динамических перегрузок, влияющих на надежность и безопасность эксплуатирующихся системы объектов [4].

Список литературы

1. Плахотникова Е.В., Протасьев В.Б. Повышение эффективности систем «запорная арматура - электропривод» // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 6. Ч. 1. С. 142 – 152.
2. Плахотникова Е.В., Елисеева Т.А. Динамические нагрузки в электроприводной арматуре // Международный журнал «Трубопроводная арматура и оборудование». 2012. № 5 (62). С. 72 – 75.
3. Плахотникова Е.В. Техническая совместимость элементов как фактор совершенства собираемых систем "электропривод — запорная арматура" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. 1 (186). С. 6 – 10.
4. Плахотникова Е.В. Повышение качества электродинамических систем «запорная арматура – электропривод» для трубопроводов АЭС с газовым теплоносителем: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 123 с.
5. Шпаков О.Н. О расчетах нагрузок в электроприводной арматуре // Арматуростроение. 2005. № 5. С. 48-51.

*Плахотникова Елена Владимировна, канд. техн. наук, доц,
e_plahotnikova@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет*

*THE RESULTS OF THE STUDY OF SYSTEMS OF "ELECTRIC - VALVES" FROM
THE PERSPECTIVE OF TECHNICAL EFFICIENCY AND ENERGY CONSUMPTION*

E.V. Plahotnikova

The paper provides a synthesis of the results of a comprehensive study of systems of "electric – valves". The feature dependencies of the total energy used to ensure the leak-proofness of the closing body of the valve, on the rigidity. Set the extremum point of the function in which requires minimum power consumption. The results reveal a new direction for improving systems and enhancing their competitiveness.

Key words: electric drive, valves, balance of energies, the balance of rigidity.

Plahotnikova Elena Vladimirovna, candidate of technical sciences, docent, e_plahotnikova@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 517.958:621.225:621.454

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГИДРОУПРУГОСТИ ТРЕХ СОСНЫХ ОБОЛОЧЕК, СВОБОДНО ОПЕРТЫХ ПО КОНЦАМ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ВЯЗКИМИ НЕСЖИМАЕМЫМИ ЖИДКОСТЯМИ В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИИ И ДАВЛЕНИЯ

К.А. Барулина, О.В. Елистратова, Д.В. Кондратов,
Ю.Н. Кондратова, Е.Л. Кузнецова

Построены математические модели системы, представляющей собой цилиндрическую трубу, образованную тремя поверхностями сосных упругих цилиндрических оболочек, свободно опертых по концам, взаимодействующих с вязкой несжимаемой жидкостью между ними, в условиях вибрации и пульсации давления. Математические модели представляют собой связанные системы уравнений в частных производных, состоящие из уравнений динамики жидкости, динамики сосных оболочек, основанных на гипотезах Кирхгофа – Лява, и советующих граничных условий.

Ключевые слова: гидроупругость, вязкая несжимаемая жидкость, сосные оболочки, вибрация, пульсация давления.

Сегодня в технических отраслях все чаще используются тонкостенные конструкции, взаимодействующие с вязкой несжимаемой жидкостью. Применение такого рода конструкций позволяет обеспечить нужную прочность при уменьшении массы и габаритов деталей, снизить и выровнять динамические воздействия и уровни вибрации, предотвратить перепады давления, уменьшить трения и изнашивания, произвести охлаждение.

Все это в совокупности определило необходимость проведения оценки поведения совместного взаимодействия упругости тонкостенных элементов конструкций и вязкой несжимаемой жидкостью между ними. Особый исследовательский интерес представляет следующая система: «упругая оболочка – вязкая несжимаемая жидкость – упругая оболочка –

вязкая несжимаемая жидкость – упругая оболочка». Такая физико-механическая модель используется как расчетная схема в перспективных образцах авиационной и ракетно-космической техники, а также может быть использована в железнодорожном транспорте, сельхозмашиностроении, топливно-энергетическом комплексе, в автомобиле-, двигателе- и агрегатостроении [1 – 19]. Вместе с тем, процесс создания математической модели, позволяющей исследовать динамические процессы в указанной системе с учетом воздействия различных источников вибрации и перепада давления, податливости оболочек, параметров жидкостей, является трудоемким и достаточно сложным.

Механическая модель системы. Вначале рассмотрим общую механическую модель исследуемой системы (рис. 1).

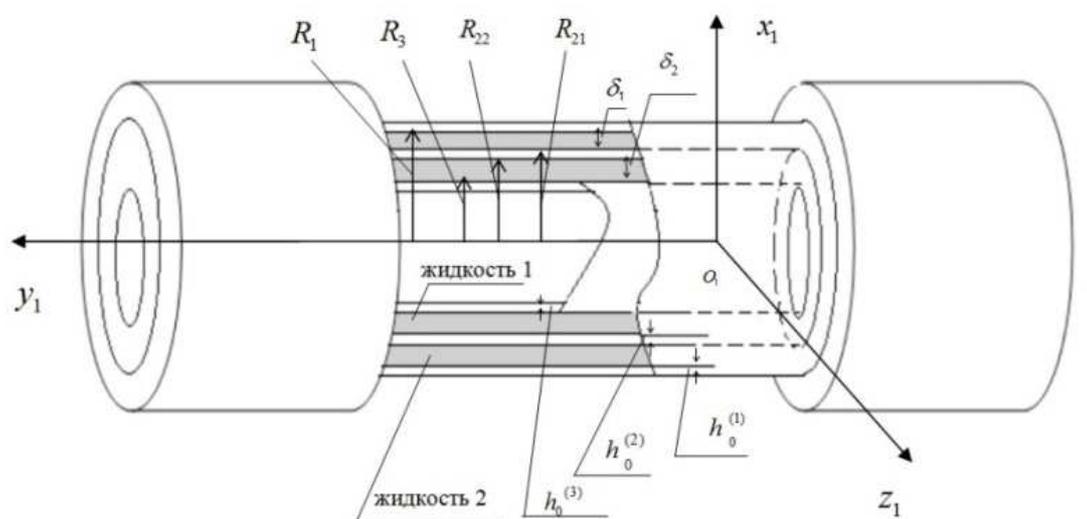


Рис. 1. Механическая модель

Будем считать, что система состоит из внешней оболочки 1, средней оболочки 2 и внутренней оболочки 3, являющихся упругими цилиндрическими оболочками, свободно опертыми на концах.

Внутренний радиус внешней оболочки обозначим R_1 , а внешний радиус внутренней оболочки – R_3 , внешний и внутренний радиусы средней оболочки – соответственно R_{21} и R_{22} . Вязкая несжимаемая жидкость 1 и 2 полностью заполняет зазор между стенками трех оболочек.

Будем предполагать, что радиальный зазор цилиндрической щели в цилиндре 1 – δ_1 и в цилиндре 2 – δ_2 .

Перемещение внутренней и средней оболочек относительно внешней на торцах отсутствует. Также перемещение внутренней и средней оболочек относительно друг друга отсутствует. Механическая система считается термостабилизированной.

При исследовании динамики указанной механической системы для слоя жидкости 1, окружающего внешнюю и среднюю оболочку, и для слоя жидкости 2, окружающего среднюю и внутреннюю оболочку, принята модель вязкой несжимаемой жидкости.

Используемая в реальных механических системах жидкость может считаться ньютоновской [1, 3, 4, 10, 15, 20].

Таким образом, модель механической системы представляет собой три упругие цилиндрические оболочки, свободно опираемые по торцам, взаимодействующие между собой через 2 слоя жидкости при наличии вибрации и давления.

Математическая модель системы. Рассмотрим движение жидкостей 1 и 2, находящихся между упругими цилиндрическими оболочками. Уравнения Навье – Стокса и уравнение неразрывности для вязкой несжимаемой жидкости с учетом переносного движения основания в выбранной системе координат r, θ, y , жестко связанной с центром координат, примут вид [4, 9, 10, 16, 19]

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial p_j}{\partial r} + \nu_j \left(\frac{\partial^2 V_{jr}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{jr}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_{jr}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_{jr}}{\partial y^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_{j\theta}}{\partial \theta} - \frac{V_{jr}}{r^2} \right) = \\
 & = W_{1z1} \cos \theta + W_{1x1} \sin \theta + \frac{\partial V_{jr}}{\partial t} + V_{jr} \frac{\partial V_{jr}}{\partial r} + \frac{V_{j\theta}}{r} \frac{\partial V_{jr}}{\partial \theta} + V_{jy} \frac{\partial V_{jr}}{\partial y} - \frac{V_{j\theta}^2}{r}, \\
 & -\frac{1}{\rho_j r} \frac{\partial p_j}{\partial \theta} + \nu_j \left(\frac{\partial^2 V_{j\theta}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{j\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_{j\theta}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_{j\theta}}{\partial y^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_{jr}}{\partial \theta} - \frac{V_{j\theta}}{r^2} \right) = \\
 & = -W_{1z1} \sin \theta + W_{1x1} \cos \theta + \frac{\partial V_{j\theta}}{\partial t} + V_{jr} \frac{\partial V_{j\theta}}{\partial r} + \frac{V_{j\theta}}{r} \frac{\partial V_{j\theta}}{\partial \theta} + V_{jy} \frac{\partial V_{j\theta}}{\partial y} + \frac{V_{jr} V_{j\theta}}{r}, \\
 & -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial p_j}{\partial y} + \nu_j \left(\frac{\partial^2 V_{jy}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{jy}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_{jy}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_{jy}}{\partial y^2} \right) = \\
 & = \frac{\partial V_{jy}}{\partial t} + V_{jr} \frac{\partial V_{jy}}{\partial r} + \frac{V_{j\theta}}{r} \frac{\partial V_{jy}}{\partial \theta} + V_{jy} \frac{\partial V_{jy}}{\partial y} \\
 & \quad \frac{\partial V_{jr}}{\partial r} + \frac{V_{jr}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{j\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial V_{jy}}{\partial y} = 0, \tag{1}
 \end{aligned}$$

где $j = 1$ – внешняя жидкость 1, $j = 2$ – внутренняя жидкость 2.

В случае отсутствия внешнего источника вибрации и наличия только пульсации давления систему уравнений можно упростить, рассматривая осесимметричный случай. В осесимметричном случае течения жидкостей между оболочками примут вид

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V_k^{(i)}}{\partial t} + V_r^{(i)} \frac{\partial V_k^{(i)}}{\partial r} + V_y^{(i)} \frac{\partial V_k^{(i)}}{\partial y} = \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial k} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_k^{(i)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_k^{(i)}}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_k^{(i)}}{\partial y^2} - \chi \frac{V_r^{(i)}}{r^2} \right), \\ & \frac{\partial V_r^{(i)}}{\partial r} + \frac{V_r^{(i)}}{r} + \frac{\partial V_y^{(i)}}{\partial y} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $k = r$ или y ; $\chi = 1$ при $k = r$, $\chi = 0$ при $k = y$; $V_r^{(i)}$, $V_y^{(i)}$ – компоненты вектора скоростей жидкости; $\rho^{(i)}$ – плотность жидкости; $\nu^{(i)}$ – кинематический коэффициент вязкости; y – координата вдоль оси симметрии Oy ; r – расстояние от оси Oy ; t – время; $i = 1$ – слой жидкости между оболочкой 1 и оболочкой 2; $i = 2$ – слой жидкости между оболочкой 2 и оболочкой 3.

Граничные условия для системы уравнений (1) на непроницаемой поверхности внутренней и внешней оболочек в цилиндрической щели представляют собой условия прилипания жидкости 1 и жидкости 2 к стенкам и запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} V_{1r} &= \frac{\partial u_3^{(i)}}{\partial t}, V_{1\theta} = \frac{\partial u_2^{(i)}}{\partial t}, V_{1y} = -\frac{\partial u_1^{(i)}}{\partial t} \text{ при } r = R_3 + \delta_1 + h_0^{(2)} + \delta_2 + u_3^{(1)} \\ V_{1r} &= \frac{\partial u_3^{(i)}}{\partial t}, V_{1\theta} = \frac{\partial u_2^{(i)}}{\partial t}, V_{1y} = -\frac{\partial u_1^{(i)}}{\partial t} \text{ при } r = R_3 + h_0^{(2)} + \delta_2 + u_3^{(2)}, \\ V_{2r} &= \frac{\partial u_3^{(i)}}{\partial t}, V_{2\theta} = \frac{\partial u_2^{(i)}}{\partial t}, V_{2y} = -\frac{\partial u_1^{(i)}}{\partial t} \text{ при } r = R_3 + u_3^{(3)}, \\ V_{2r} &= \frac{\partial u_3^{(i)}}{\partial t}, V_{2\theta} = \frac{\partial u_2^{(i)}}{\partial t}, V_{2y} = -\frac{\partial u_1^{(i)}}{\partial t} \text{ при } r = R_3 + \delta_2 + u_3^{(2)}, \\ p &= p^+ \text{ при } y = l/2, p = p^- \text{ при } y = -l/2. \end{aligned} \quad (3)$$

где $u_1^{(i)} = u_1^{(i)}(y, \theta, t)$ – продольное упругое перемещение оболочки, положительное в направлении \bar{n}_s , противоположном направлению \bar{j} ; $u_2^{(i)} = u_2^{(i)}(y, \theta, t)$ – окружное упругое перемещение оболочки в направлении \bar{n}_θ ; $u_3^{(i)} = u_3^{(i)}(y, \theta, t)$ – прогиб оболочки, положительный в направлении \bar{n} , совпадающем с \bar{n}_r и противоположным направлением к центру кривизны; $\bar{u}^{(i)} = u_1^{(i)}\bar{n}_s + u_2^{(i)}\bar{n}_\theta + u_3^{(i)}\bar{n}$ – вектор упругих перемещений оболочки. Здесь и далее верхний индекс $i = 1$ относится к внешней оболочке, $i = 2$ – к средней оболочке, $i = 3$ – к внутренней оболочке.

Кроме того, необходимы условия периодичности параметров течения по θ с периодом 2π (условия замкнутости потока жидкости).

Граничные условия прилипания жидкости к поверхностям оболочек в осесимметричном случае (2) при отсутствии вибрации примут вид

$$V_r = \partial u_3 / \partial t, V_y = -\partial u_1 / \partial t \text{ при } r = R_2 + \delta + u_3; V_r = 0, V_y = 0 \text{ при } r = R_2; \\ p = p^+ \text{ при } y = l/2, p = p^- \text{ при } y = -l/2, \quad (4).$$

Скалярные уравнения динамики внешней и внутренней упругих цилиндрических оболочек, основанные на гипотезах Кирхгофа – Лява, с учётом переносного движения относительно инерциального пространства запишутся в виде [4, 7, 16]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 u_1^{(i)}}{\partial y^2} + \frac{1-\mu_0^{(i)}}{2} \frac{1}{(R^{(i)})^2} \frac{\partial^2 u_1^{(i)}}{\partial \theta^2} - \frac{1+\mu_0^{(i)}}{2} \frac{1}{R^{(i)}} \frac{\partial^2 u_2^{(i)}}{\partial y \partial \theta} - \frac{\mu_0^{(i)}}{R^{(i)}} \frac{\partial u_3^{(i)}}{\partial y} = \\ & = \frac{1-\left(\mu_0^{(i)}\right)^2}{E^{(i)} h_0^{(i)}} \left[\rho_0^{(i)} h_0^{(i)} W_{Os}^{(i)} - G_1^{(i)} \right]; \\ & - \frac{1+\mu_0^{(i)}}{2} \frac{1}{R^{(i)}} \frac{\partial^2 u_1^{(i)}}{\partial y \partial \theta} + \frac{1-\mu_0^{(i)}}{2} \frac{\partial^2 u_2^{(i)}}{\partial y^2} + \frac{1}{(R^{(i)})^2} \frac{\partial^2 u_2^{(i)}}{\partial \theta^2} + \\ & + \left(a_0^{(i)}\right)^2 \left[2\left(1-\mu_0^{(i)}\right) \frac{\partial^2 u_2^{(i)}}{\partial y^2} + \frac{1}{(R^{(i)})^2} \frac{\partial^2 u_2^{(i)}}{\partial \theta^2} \right] + \\ & + \frac{1}{(R^{(i)})^2} \frac{\partial u_2^{(i)}}{\partial \theta} - \left(a_0^{(i)}\right)^2 \left[\left(2-\mu_0^{(i)}\right) \frac{\partial^3 u_3^{(i)}}{\partial y^2 \partial \theta} + \frac{\partial^3 u_3^{(i)}}{\partial \theta^3} \right] = \quad (5) \\ & = \frac{1-\left(\mu_0^{(i)}\right)^2}{E^{(i)} h_0^{(i)}} \left[\rho_0^{(i)} h_0^{(i)} W_{O\theta}^{(i)} - G_2^{(i)} \right], \\ & - \frac{\mu_0^{(i)}}{R^{(i)}} \frac{\partial u_1^{(i)}}{\partial y} + \frac{1}{(R^{(i)})^2} \frac{\partial u_2^{(i)}}{\partial \theta} - \left(a_0^{(i)}\right)^2 \left[\left(2-\mu_0^{(i)}\right) \frac{\partial^3 u_2^{(i)}}{\partial y^2 \partial \theta} + \frac{1}{(R^{(i)})^2} \frac{\partial^3 u_2^{(i)}}{\partial \theta^3} \right] + \\ & + \frac{u_3^{(i)}}{R^{(i)}} + \left(a_0^{(i)}\right)^2 \left[\left(R^{(i)}\right)^2 \frac{\partial^4 u_3^{(i)}}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 u_3^{(i)}}{\partial y^2 \partial \theta^2} + \frac{1}{(R^{(i)})^2} \frac{\partial^4 u_3^{(i)}}{\partial \theta^4} \right] = \\ & = \frac{1-\left(\mu_0^{(i)}\right)^2}{E^{(i)} h_0^{(i)}} \left[-\rho_0^{(i)} h_0^{(i)} W_{On}^{(i)} + G_3^{(i)} \right], \quad i=1,2,3, \end{aligned}$$

где верхний индекс 1 относится к внешней оболочке, а индекс 2 – к средней оболочке и индекс 3 – к внутренней оболочке; $E^{(i)}$ – модуль Юнга, $\mu_0^{(i)}$ – коэффициент Пуассона, $\rho_0^{(i)}$ – плотность материала, $R^{(i)}$ – радиус срединной поверхности, $h_0^{(i)}$ – толщина оболочки, $W_{OS}^{(i)}$, $W_{O\theta}^{(i)}$, $W_{On}^{(i)}$ – проекции абсолютного ускорения единицы площади срединной поверхности оболочек $\bar{W}_O^{(i)} = \bar{W}_1 + \frac{\partial^2 \bar{u}^{(i)}}{\partial t^2}$, $i=1,2,3$ на оси $\bar{n}_s, \bar{n}_\theta, \bar{n}$ (продольное и окружное направления в срединной поверхности оболочек и по нормали к ней), имеющие вид

$$\begin{aligned} G_1^{(1)} &= q_s^{(1)}, G_1^{(2)} = q_{s2}^{(2)} + q_{s1}^{(2)}, G_1^{(3)} = q_3^{(3)}, \\ G_2^{(1)} &= q_\theta^{(1)}, G_2^{(2)} = q_{\theta2}^{(2)} + q_{\theta1}^{(2)}, G_2^{(3)} = q_\theta^{(3)}, \\ G_3^{(1)} &= -q_n^{(1)}, G_3^{(2)} = q_{n2}^{(2)} - q_{n1}^{(2)}, G_3^{(3)} = q_n^{(3)}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$W_{OS}^{(i)} = \frac{\partial^2 u_1^{(i)}}{\partial t^2}, W_{O\theta}^{(i)} = W_{1x1} \cos \theta - W_{1z1} \sin \theta + \frac{\partial^2 u_2^{(i)}}{\partial t^2},$$

$$W_{On}^{(i)} = W_{1x1} \sin \theta + W_{1z1} \cos \theta + \frac{\partial^2 u_3^{(i)}}{\partial t^2}, i=1,2,3.$$

Напряжения на поверхностях оболочек со стороны слоя жидкости записываются в виде $q_s^{(1)}; q_\theta^{(1)}; q_n^{(1)}; q_{s1}^{(2)}; q_{s2}^{(2)}; q_{1\theta}^{(2)}; q_{2\theta}^{(2)}; q_{n1}^{(2)}; q_{n2}^{(2)}; q_s^{(3)}; q_\theta^{(3)}; q_n^{(3)}$.

В осесимметричном случае при отсутствии вибрации уравнения динамики оболочек, основанные на гипотезах Кирхгофа – Лява, запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_1^{(i)}}{\partial y^2} + \frac{\mu_0^{(i)}}{R^{(i)}} \frac{\partial u_3^{(i)}}{\partial y} &= E^{(i)} \frac{1 - (\mu_0^{(i)})^2}{E^{(i)} h_0^{(i)}} \left[\rho_0^{(i)} h_0^{(i)} \frac{\partial^2 u_1^{(i)}}{\partial t^2} - G_1^{(i)} \right]; \\ -\frac{\mu_0^{(i)}}{R^{(i)}} \frac{\partial u_1^{(i)}}{\partial y} + \frac{u_3^{(i)}}{R^{(i)}} + (a_0^{(i)})^2 \left[(R^{(i)})^2 \frac{\partial^4 u_3^{(i)}}{\partial y^4} \right] &= \\ = \frac{1 - (\mu_0^{(i)})^2}{E^{(i)} h_0^{(i)}} \left[-\rho_0^{(i)} h_0^{(i)} \frac{\partial^2 u_3^{(i)}}{\partial t^2} + G_3^{(i)} \right], & i=1,2,3, \end{aligned} \quad (7)$$

где верхний индекс 1 относится к внешней оболочке, а индекс 2 – к средней оболочке и индекс 3 – к внутренней оболочке; $E^{(i)}$ – модуль Юнга; $\mu_0^{(i)}$ – коэффициент Пуассона; $\rho_0^{(i)}$ – плотность материала; $R^{(i)}$ – радиус средней поверхности; $h_0^{(i)}$ – толщина оболочки; q – напряжения на поверхностях оболочек со стороны слоя жидкости.

Граничные условия для перемещений оболочки состоят в условиях свободного опирания на торцах [13, 16]:

$$\frac{\partial u_1^{(i)}}{\partial y} = 0, u_2^{(i)} = 0, u_3^{(i)} = 0, \frac{\partial^2 u_3^{(i)}}{\partial y^2} = 0 \text{ при } y = \pm \frac{l}{2}. \quad (8)$$

Кроме того, для обеих оболочек ставятся условия периодичности параметров по θ с периодом 2π .

Методы решения задачи. Дальнейшее исследование задачи будем осуществлять в следующих безразмерных переменных:

$$\xi = \frac{(r - R_2)}{\delta}, \theta = \theta, \tau = \omega t, \zeta = \frac{2y}{l}, \sigma = \frac{l}{2R_2},$$

$$V_r = w_m^{(1)} \omega u_\xi, V_\theta = \frac{w_m^{(1)} \omega}{\psi} u_\theta, V_y = \frac{w_m^{(1)} \omega}{\psi} \frac{l}{2R_2} u_\zeta;$$

$$u_1^{(i)} = u_m^{(i)} U_1^{(i)}, u_2^{(i)} = v_m^{(i)} U_2^{(i)}, u_3^{(i)} = w_m^{(i)} U_3^{(i)}, \text{Re} = \frac{\delta^2 \omega}{\nu}, \psi = \frac{\delta}{R_2} \ll 1, \quad (9)$$

$$\lambda^{(i)} = \frac{w_m^{(i)}}{\delta} \ll 1; \lambda^{(2)} = \frac{w_m^{(2)}}{w_m^{(1)}} \lambda^{(1)}; (c^{(i)})^2 = \frac{E^{(i)}}{\rho_0^{(i)} (1 - (\mu_0^{(i)})^2)}, i = 1, 2, 3.$$

При этом редуцированное давление в слое жидкости для цилиндрической щели будет иметь вид

$$p = p_0 + \rho R_2 \frac{w_m^{(1)} \omega^2}{\psi \text{Re}} \left\langle P - \text{Re} \left[\frac{\psi E_z}{w_m^{(1)}} f_{z0}''(\tau) \cos \theta + \frac{\psi E_x}{w_m^{(1)}} f_{x0}''(\tau) \sin \theta \right] \right\rangle. \quad (10)$$

Для решения задачи гидроупругости будем применять метод возмущений совместно с методом заданных. За малый параметр принимается относительный прогиб оболочек $\lambda^{(i)}$, который считается величиной значительно меньше единицы, что применительно к реальным механическим системам действительно имеет место. Введенные в рассмотрение указанные малые параметры $\lambda^{(i)}$ позволяют линеаризовать задачу.

Будем предполагать, что применительно к рассматриваемой механической системе отношение δ к R_2 очень мало. Таким образом, ψ является малым параметром, характеризующим ширину цилиндрического слоя жидкости, окружающей внутреннюю цилиндрическую оболочку. Малый

параметр ψ позволяет упростить постановку задачи гидроупругости (1), (3), (5), (8), оставив только выражения порядка $O(\psi^0)$. Задача (2), (4), (6), (8) будет решаться аналогичными методами.

Также в задачу гидродинамики входит малый параметр $\lambda^{(1)} \ll 1$, характеризующий относительный прогиб внешней оболочки. Решение представляется в виде асимптотического разложения по степеням малого параметра $\lambda^{(1)}$:

$$P = P_0 + \lambda^{(1)} P_1 + \dots,$$

$$u_\theta = u_{\theta 0} + \lambda^{(1)} u_{\theta 1} + \dots, u_\xi = u_{\xi 0} + \lambda^{(1)} u_{\xi 1} + \dots, u_\zeta = u_{\zeta 0} + \lambda^{(1)} u_{\zeta 1} + \dots, \quad (11)$$

$$U_1^{(i)} = U_{10}^{(i)} + \lambda^{(i)} U_{11}^{(i)} + \dots, U_2^{(i)} = U_{20}^{(i)} + \lambda^{(i)} U_{21}^{(i)} + \dots, U_3^{(i)} = U_{30}^{(i)} + \lambda^{(i)} U_{31}^{(i)} + \dots$$

Разложения (11) подставляются в безразмерные уравнения динамики жидкости и динамики оболочек, а также в безразмерные граничные условия. Приравнивая нулю коэффициенты при различных степенях $\lambda^{(1)}$ в нулевом приближении по $\lambda^{(1)}$, получаются уравнения гидродинамики

$$\frac{\partial P_0}{\partial \xi} = 0, \operatorname{Re} \frac{\partial u_{\theta 0}}{\partial \tau} + \frac{\partial P_0}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 u_{\theta 0}}{\partial \xi^2} = 0,$$

$$\operatorname{Re} \frac{\partial u_{\zeta 0}}{\partial \tau} + \frac{1}{\sigma^2} \frac{\partial P_0}{\partial \zeta} - \frac{\partial^2 u_{\zeta 0}}{\partial \xi^2} = 0, \frac{\partial u_{\xi 0}}{\partial \xi} + \frac{\partial u_{\theta 0}}{\partial \theta} + \frac{\partial u_{\zeta 0}}{\partial \zeta} = 0; \quad (12)$$

граничные условия на непроницаемых поверхностях

$$u_{\xi 0} = \frac{\partial U_{30}^{(1)}}{\partial \tau}; u_{\theta 0} = 0; u_{\zeta 0} = 0 \text{ при } \xi = 1,$$

$$u_{\xi 0} = \frac{w_m^{(2)}}{w_m^{(1)}} \frac{\partial U_{30}^{(2)}}{\partial \tau}; u_{\theta 0} = 0; u_{\zeta 0} = 0 \text{ при } \xi = 0, \quad (13)$$

$$P_0 = P^+ \text{ при } \zeta = 1, P_0 = P^- \text{ при } \zeta = -1.$$

Уравнения динамики внутренней и внешней упругих замкнутых цилиндрических оболочек в нулевом приближении по $\lambda^{(1)}$ будут иметь вид

$$\frac{(c^{(i)})^2 \rho_0^{(i)} h_0^{(i)}}{(R^{(i)})^2} \left\{ \left(\frac{2R^{(i)}}{l} \right) u_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_1^{(i)}}{\partial \zeta^2} + \frac{1 - \mu_0^{(i)}}{2} u_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_1^{(i)}}{\partial \theta^2} - \right.$$

$$\left. - \frac{1 + \mu_0^{(i)}}{2} \left(\frac{2R^{(i)}}{l} \right) v_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_2^{(i)}}{\partial \zeta \partial \theta} - \mu_0^{(i)} \left(\frac{2R^{(i)}}{l} \right) w_m^{(i)} \frac{\partial U_3^{(i)}}{\partial \zeta} \right\} -$$

$$- \rho_0^{(i)} h_0^{(i)} \omega^2 u_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_1^{(i)}}{\partial \tau^2} = 0;$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{(c^{(i)})^2 \rho_0^{(i)} h_0^{(i)}}{(R^{(i)})^2} \left\{ -\frac{1+\mu_0^{(i)}}{2} \frac{2R^{(i)}}{l} u_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_1^{(i)}}{\partial \zeta \partial \theta} + \frac{1-\mu_0^{(i)}}{2} \left(\frac{2R^{(i)}}{l} \right)^2 v_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_2^{(i)}}{\partial \zeta^2} + \right. \\
 & + v_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_2^{(i)}}{\partial \theta^2} + w_m^{(i)} \frac{\partial U_3^{(i)}}{\partial \theta} + (a_0^{(i)})^2 v_m^{(i)} \left[2(1-\mu_0^{(i)}) \left(\frac{2R^{(i)}}{l} \right)^2 \frac{\partial^2 U_2^{(i)}}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial^2 U_2^{(i)}}{\partial \theta^2} \right] - \\
 & \left. - (a_0^{(i)})^2 w_m^{(i)} \left[(2-\mu_0^{(i)}) \left(\frac{2R^{(i)}}{l} \right)^2 \frac{\partial^3 U_3^{(i)}}{\partial \zeta^2 \partial \theta} + \frac{\partial^3 U_3^{(i)}}{\partial \theta^3} \right] \right\} - \\
 & - \rho_0^{(i)} h_0^{(i)} \omega^2 \left(\frac{W_{1x1}}{\omega^2} \cos \theta - \frac{W_{1z1}}{\omega^2} \sin \theta + v_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_2^{(i)}}{\partial \tau^2} \right) = 0, \\
 & \frac{(c^{(i)})^2 \rho_0^{(i)} h_0^{(i)}}{(R^{(i)})^2} \left\{ -\mu_0^{(i)} \frac{2R^{(i)}}{l} u_m^{(i)} \frac{\partial U_1^{(i)}}{\partial \zeta} + v_m^{(i)} \frac{\partial U_2^{(i)}}{\partial \theta} - \right. \tag{14} \\
 & - (a_0^{(i)})^2 v_m^{(i)} \left[(2-\mu_0^{(i)}) \left(\frac{2R^{(i)}}{l} \right)^2 \frac{\partial^3 U_2^{(i)}}{\partial \zeta^2 \partial \theta} + \frac{\partial^3 U_2^{(i)}}{\partial \theta^3} \right] + w_m^{(i)} U_3^{(i)} + \\
 & \left. + (a_0^{(i)})^2 w_m^{(i)} \left[\left(\frac{2R^{(i)}}{l} \right)^4 \frac{\partial^4 U_3^{(i)}}{\partial \zeta^4} + 2 \left(\frac{2R^{(i)}}{l} \right)^2 \frac{\partial^4 U_3^{(i)}}{\partial \zeta^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial^4 U_3^{(i)}}{\partial \theta^4} \right] \right\} - \\
 & - \rho_0^{(i)} h_0^{(i)} \omega^2 \left(\frac{W_{1x1}}{\omega^2} \sin \theta + \frac{W_{1z1}}{\omega^2} \cos \theta + w_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_3^{(i)}}{\partial \tau^2} \right) = (-1)^{i-1} \frac{\rho R_2 w_m^{(1)} \omega^2}{\operatorname{Re} \psi} \times \\
 & \times \left\{ \frac{\operatorname{Re} \psi p_0}{\rho R_2 w_m^{(1)} \omega^2} + P - \operatorname{Re} \left[\frac{\psi E_x}{w_m^{(1)}} f_{x0}''(\tau) \sin \theta + \frac{\psi E_z}{w_m^{(1)}} f_{z0}''(\tau) \cos \theta \right] \right\} \Big|_{\xi=\xi_*^{(i)}}
 \end{aligned}$$

а также граничные условия свободного опирания по торцам внешней и внутренней оболочек запишутся в виде

$$\frac{\partial U_1^{(i)}}{\partial \zeta} = 0, U_2^{(i)} = 0, U_3^{(i)} = 0, \frac{\partial^2 U_3^{(i)}}{\partial \zeta^2} = 0 \quad \text{при } \zeta = \pm 1. \tag{15}$$

В результате получили линеаризованную постановку задачи в нулевом приближении по λ . В дальнейшем решаются уравнения динамики вязкой несжимаемой жидкости для определения гидродинамического давления в слое жидкости и компоненты вектора скорости движения жидко-

сти, которые подставляются в уравнения динамики оболочек. Уравнения динамики оболочек решаются методом Бубнова – Галеркина, при этом упругие перемещения оболочек будут представляться в виде бесконечных рядов по тригонометрическим функциям продольной координаты.

Таким образом, получили математическую модель механической системы, состоящей из трех соосных упругих цилиндрических оболочек, взаимодействующих через слой вязкой несжимаемой жидкости при наличии внешней вибрации и пульсации давления. Также получен упрощенный частный осесимметричный случай рассматриваемой механической модели, когда в системе отсутствует внешняя вибрация и рассматривается только перепад давления на концах трубы.

Математическая модель рассматриваемой системы «оболочка – жидкость – оболочка – жидкость – оболочка» представляет собой связанную систему уравнений, включающую нелинейные уравнения в частных производных Навье–Стокса и уравнение неразрывности для описания динамики жидкостей, находящихся между упругими цилиндрическими оболочками, также уравнения в частных производных для описания динамики упругих цилиндрических оболочек, полученные исходя из гипотез Кирхгофа–Лява и соответствующие граничные условия. Предложен метод решения получившейся задачи гидроупругости. Амплитудно-частотные характеристики, которые будут получены в результате исследования указанных моделей оболочек позволят выявить опасные режимы работы.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 13-01-00049-а, 15-01-01604-а, и Гранта Президента Российской Федерации МД-4560.2015.8, МД-6012.2016.8.

Список литературы

1. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. М.: Машгиз, 1963. 696 с.
2. Плаксина И.В., Кондратов Д.В., Кузнецова Е.Л. Гидроупругость геометрически нерегулярной оболочки, содержащей слой вязкой жидкости и упругий цилиндр, в условиях гармонического давления // Сборник научных трудов Sworld. 2013. Т. 6. № 4. С. 17 – 20.
3. Математическое моделирование вынужденных колебаний гильзы цилиндра двигателя внутреннего сгорания / И.Н. Епишкина, Л.И. Могилевич, В.С. Попов, А.А. Симдянкин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2001. № 4. С. 19 – 26.
4. Кондратов Д.В., Могилевич Л.И. Упругогидродинамика машин и приборов на транспорте. М.: РГОТУПС, 2007. 169 с.
5. Могилевич Л.И., Попов В.С. Динамика взаимодействия упругого цилиндра со слоем вязкой несжимаемой жидкости // Известия Российской Академии наук. Механика твердого тела. 2004. № 5. С. 179 – 190.

6. Кондратов Д.В., Могилевич Л.И. Математическое моделирование процессов взаимодействия двух цилиндрических оболочек со слоем жидкости между ними при отсутствии торцевого истечения в условия вибрации // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. Т. 3. № 2. С. 15 – 23

7. Гольденвейзер А.Л., Лидский В.В., Товстик П.Е. Свободные колебания тонких упругих оболочек. М.: Наука, 1978. 383 с.

8. Кондратов Д.В., Кондратова Ю.Н., Могилевич Л.И. Исследование амплитудных частотных характеристик колебаний упругих стенок трубы кольцевого профиля при пульсирующем движении вязкой жидкости в условиях жесткого защемления по торцам // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 3. С. 15 – 21.

9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.

10. Кондратов Д.В., Калинина А.В. Исследование процессов гидроупругости ребристой трубы кольцевого профиля при воздействии вибрации // Труды МАИ. 2014. № 78. С. 4.

11. Медведский А.Л., Рабинский Л.Н. Метод поверхностных функций влияния в нестационарных задачах дифракции. М.: Издательство. МАИ, 2007. 255 с.

12. Формалев В.Ф., Кузнецова Е.Л., Селин И.А. Аналитическое исследование задач типа Стефана в композиционных материалах с произвольным числом подвижных границ фазовых превращений // Механика композиционных материалов и конструкций. 2009. Т. 15. № 2. С. 256-264.

13. Кондратов Д.В., Кондратова Ю.Н., Могилевич Л.И. Математическое моделирование ламинарного движения жидкости в упругой цилиндрической трубе кольцевого профиля со свободным опиранием по торцам // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. Т. 1. № 1. С. 33 – 40.

14. Могилевич Л.И., Попов В.С. Динамика взаимодействия цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания и слоя охлаждающей жидкости // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2003. № 1. С. 79.

15. Двигатели внутреннего сгорания / под ред. А.С. Орлина. Т. 2. Конструкция и расчет. М.: Машгиз, 1962. 379 с.

16. Кондратова Ю.Н., Кондратов Д.В., Могилевич Л.И. Гидроупругость трубопровода кольцевого профиля со свободным опиранием при воздействии вибрации // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 4. № 4 (62). С. 9-14.

17. Могилевич Л.И., Попов В.С., Христофорова А.В. Математические вопросы гидроупругости трехслойных элементов конструкций. Саратов: Изд-во КУБиК, 2012. 123 с.

18. Плоская задача дифракции акустической волны давления на тонкой ортотропной панели, помещенной в жесткий экран / А.Г. Горшков, С.И. Жаворонок, А.Л. Медведский, Л.Н. Рабинский // Изв. РАН. МТТ. №1. 2004. С. 209 – 220.

19. Барулина К.А., Кондратов Д.В., Кузнецова Ек.Л. Гидроупругость трех соосных оболочек, свободно опертых по концам, взаимодействующих с вязкими жидкостями в условиях вибрации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 3. С. 25 – 36.

20. Математическая модель движения пульсирующего слоя вязкой жидкости в канале с упругой стенкой. / Р.В. Агеев, Е.Л. Кузнецова, Н.И. Куликов, Л.И. Могилевич, В.С. Попов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2014. № 3. С. 17-35.

Барулина Ксения Андреевна, асп., lentiaikakc@yandex.ru, Россия, Саратов, Поволжский институт управления имени П.А.Столыпина – филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ,

Елистратова Ольга Васильевна асп., olgaseregina@mail.ru, Россия, Саратов, Поволжский институт управления имени П.А.Столыпина – филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ,

Кондратов Дмитрий Вячеславович, д-р физ.-мат. наук, доц., зав. каф., KondratovDV@yandex.ru, Россия, Саратов, Поволжский институт управления имени П.А.Столыпина – филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ,

Кондратова Юлия Николаевна, канд. физ.-мат. наук, доц., kondratovaun@mail.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского,

Кузнецова Екатерина Львовна, д-р физ.-мат. наук, проф., lareyna@mail.ru, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS HYDROELASTICITY THREE COAXIAL SHELLS FREELY SUPPORTED ON END INTERACTING WITH A VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID UNDER VIBRATION, AND PRESSURE

K.A. Barulina, O. V. Elistratova, D.V. Kondratov, J.N. Kondratova, E.L. Kuznetsova

Mathematical model of the system, which is a cylindrical tube formed by three coaxial surfaces of elastic cylindrical shells, simply supported at the ends of interacting with a viscous incompressible fluid between them, in terms of vibration and pulsation is constructed. Construction of mathematical models of the system are related to partial differential equations consisting of equations of fluid dynamics, the dynamics of coaxial shells based on Kirchhoff-Love, and the boundary conditions.

Key words: hydroelasticity, a viscous incompressible liquid, coaxial shells, vibration, pressure.

Barulina Kseniya Andreevna, postgraduate, lentiaikakc@yandex.ru, Russia, Saratov, Volga Management of Institute of Stolypin – a branch of the Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation,

Elistratova Olga Vasilevna, postgraduate, olgaseregina@mail.ru, Russia, Saratov, Volga Management Institute of Stolypin – a branch of the Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation,

Kondratov Dmitry Vyacheslavovich, doctor of physical and mathematical sciences, chief of chair, KondratovDV@yandex.ru, Russia, Saratov, Volga Management Institute of Stolypin – a branch of the Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation,

Kondratova Julia Nikolaevna, candidate of physical and mathematical sciences, docent, kondratvaun@mail.ru, Russia, Saratov, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky,

Kuznetsova Ekaterina Lvovna, doctor of physical and mathematical sciences, professor, lareyna@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University)

УДК 621.879

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ ОПЕРАТОРА ДОРОЖНОЙ УБОРОЧНО-ПОДМЕТАЛЬНОЙ МАШИНЫ

П.А. Корчагин, И.А. Реброва, И.А. Тетерина

Отражены результаты экспериментальных исследований дорожной уборочно-подметальной машины на базе трактора МТЗ-80 в различных режимах работы. Представлены результаты однофакторного дисперсионного анализа, с помощью которого были определены основные эксплуатационные параметры и выявлена степень их влияния на уровень динамических воздействий на рабочем месте оператора.

Ключевые слова: вибрация, виброзащита, дорожная уборочно-подметальная машина.

Рост численности населения и расширение инфраструктуры городов обуславливают потребность в надежных коммунальных машинах, которые качественно справлялись бы с расчисткой и благоустройством территорий, вывозом мусора и другими задачами [1]. Для их решения наиболее востребованной машиной, состоящей на балансе большинства коммунальных служб, является дорожная уборочно-подметальная машина (ДУПМ) на базе трактора МТЗ-80. Навесное оборудование этих машин позволяет использовать их для очистки дорог, тротуаров, строительных площадок и других участков от мусора, снега, песчаных наносов.

ДУПМ (рис.1) отличаются высокой надежностью и высокой производительностью при низких эксплуатационных затратах. Однако сегодня вопрос повышения комфортных условий труда операторов этих машин остается открытым, несмотря на то, что решение этой проблемы позволило бы значительно повысить рабочие и транспортные скорости машины, а значит, и ее эффективность [2].



Рис. 1. Дорожная уборочно-подметальная машина на базе трактора МТЗ-80

Вывод о том, что виброзащитная система (ВЗС) рабочего места оператора работает недостаточно эффективно, обусловил необходимость проведения экспериментальных исследований, целью которых было определение уровня вибрации на рабочем месте оператора.

Испытания проводились на базе БПОУ «Омский автотранспортный колледж» в светлое время суток на поверхности с твердым покрытием со свежесвыпавшим снегом толщиной не более 50 мм. Температура окружающей среды была в пределах $-15...-18$ °С.

При проведении испытаний использовались комплект портативной многофункциональной виброизмерительной аппаратуры «Экофизика-110А» (HF) с датчиками VIBRATION TRANSDUCER AP 98-100-01 для измерения параметров вибрации, а также цифровой тахометр DIGITAL TACHOMETER DT-2234A для измерения числа вращений щеточного рабочего органа.

Варьируемыми параметрами при проведении эксперимента были выбраны:

- режимы работы машины (рабочий режим, режим холостого хода с включенным и выключенным щеточным рабочим органом);
- число вращений коленчатого вала ДВС (малые, средние, высокие обороты);
- число вращений щеточного рабочего органа (на малых, средних, высоких оборотах вращения коленчатого вала ДВС)[3].

Выходной информативный параметр – среднеквадратические скорректированные значения виброускорения в октавных полосах частот от 1 до 63 Гц.

Число оборотов вращения коленчатого вала ДВС регистрировалось тахометром, расположенным на панели приборов машины, число оборотов вращения щеточного рабочего органа (ЩРО) – цифровым тахометром. Числовые значения среднеквадратического скорректированного виброускорения в выбранных точках регистрировались прибором «Экофизика» [3].

Сравнительный анализ уровня среднеквадратических значений скорректированного виброускорения в октавных полосах частот на рабочем месте оператора (полу кабины) при вращении 1680 об/мин коленчатого вала в различных режимах работы ДУПМ позволил оценить уровень эффективности работы системы виброзащиты оператора (рис. 2).

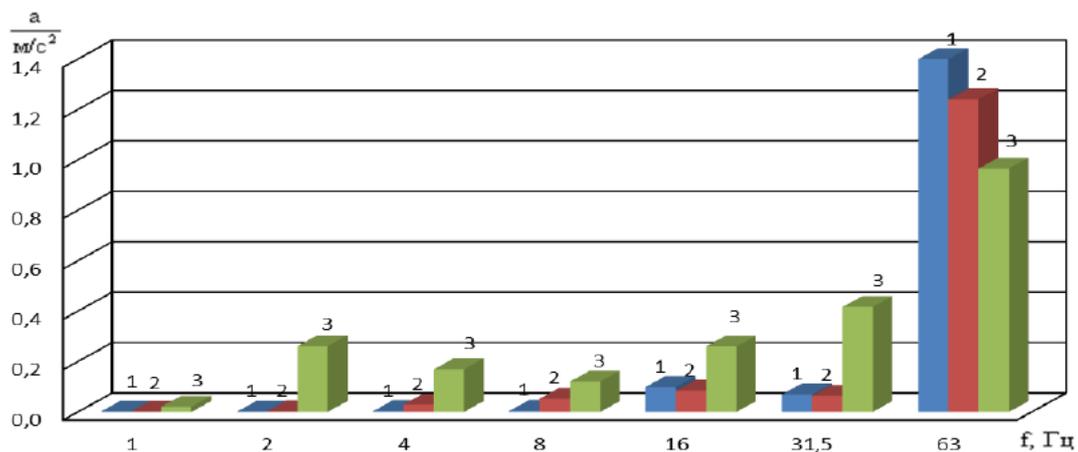


Рис. 2. Среднеквадратические значения скорректированного виброускорения в октавных полосах частот на рабочем месте оператора (пол кабины) при частоте вращения коленчатого вала 1680 об/мин в режимах: 1 – холостой ход без включения рабочего органа; 2 – холостой ход с включенным рабочим органом; 3 – рабочий режим при скорости 10 км/ч

Проведенный анализ дал возможность сделать ряд выводов. В рабочем режиме отмечены самые высокие уровни среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на рабочем месте (пол кабины) оператора. На частоте 2 Гц в рабочем режиме уровень среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на полу кабины резко возрастает. В диапазоне частот от 2 до 8 Гц наблюдается снижение уровня среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на полу кабины, а в диапазоне частот от 8 до 63 Гц происходит последующее его возрастание. На частоте 63 Гц в режимах холостого хода с

включенным и выключенным ЩРО отмечены наиболее высокие уровни среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на полу кабины.

Кроме того, в ходе эксперимента исследовалось влияние частоты вращения ЩРО на величину виброускорения на рабочем месте оператора в режиме холостого хода (рис. 3, рис. 4). Самые высокие уровни среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на полу кабины отмечены при 190 об/мин ЩРО на частоте 63 Гц, на кресле оператора – при 138 об/мин ЩРО на частоте 31,5 Гц. Наблюдается постоянный рост среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на рабочем месте оператора (пол кабины и кресло) на 90, 138, 190 об/мин ЩРО в диапазоне частот от 2 до 63 Гц.

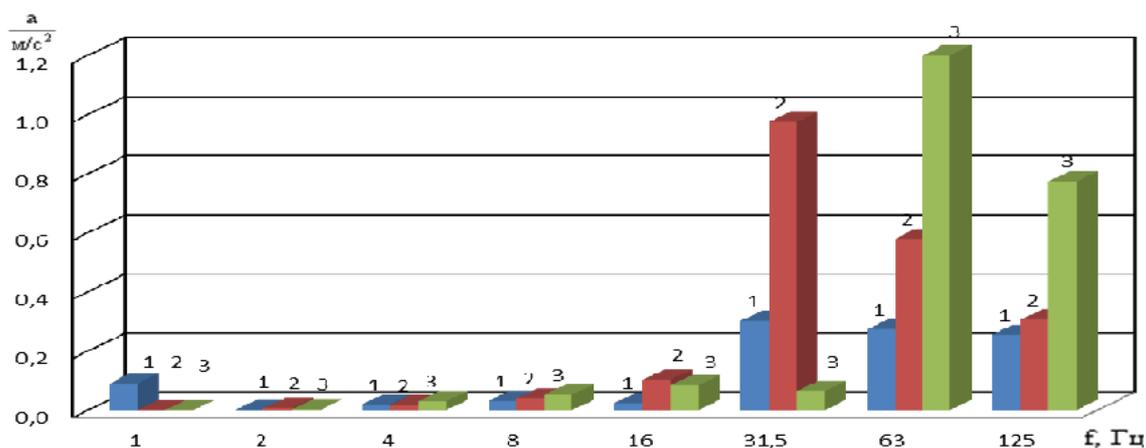


Рис. 3. Среднеквадратические значения с скорректированного виброускорения в октавных полосах частот на рабочем месте оператора (пол кабины) в режиме холостого хода при различных частотах вращения щеточного рабочего органа: 1 – 90 об/мин; 2 – 138 об/мин; 3 – 190 об/мин

Наиболее высокие уровни среднеквадратических значений скорректированного виброускорения на рабочем месте оператора (пол кабины) отмечены: при частоте вращения ЩРО 90 и 190 об/мин – на частотах 31,5 и 63 Гц; при частоте вращения ЩРО 138 об/мин – в диапазоне частот от 16 до 63 Гц.

Решить проблему неэффективности работы ВЗС оператора возможно путем разработки научно обоснованной методики выбора оптимальных параметров ВЗС рабочего места оператора, в основе которой лежит математическая модель, позволяющая оптимизировать временные и материальные затраты для достижения максимального результата [4].

Одним из основных требований, предъявляемых к математической модели, наряду с универсальностью, экономичностью, целесообразностью является достаточная точность отражения процессов, происходящих в исследуемой динамической системе [5]. Для достижения максимальной точности необходимо выделить параметры, оказывающие существенное влияние на процессы, происходящие в системе «возмущающие воздействия – ДУПМ – оператор».

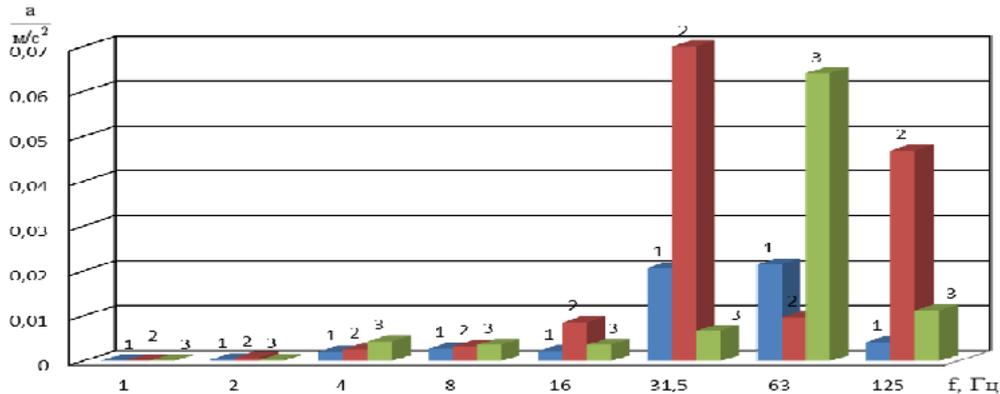


Рис. 4. Среднеквадратические значения с скорректированного виброускорения в октавных полосах частот на рабочем месте оператора (кресло) в режиме холостого хода при различных оборотах щеточного рабочего органа: 1 – 90 об/мин; 2 – 138 об/мин; 3 – 190 об/мин

Исследование влияния режимов работы ДУПМ, частоты вращения ЦРО и оборотов ДВС на величину виброускорения на рабочем месте оператора проведено методом однофакторного дисперсионного анализа. Решение о существенности влияния факторного признака на исход эксперимента зависит от того, насколько значимой является составляющая дисперсии, обусловленная этим конкретным фактором, по сравнению с дисперсией, обусловленной ошибкой эксперимента. Поэтому для оценки влияния условий работы ДУПМ на уровень вибрации F-критерий Фишера при уровне значимости результата составит 5 %.

В качестве факторных признаков были выбраны:

- 1) режим работы машины;
- 2) частота вращения ЦРО;
- 3) обороты ДВС.

Результативный признак – среднеквадратические значения скорректированного виброускорения на рабочем месте оператора (пол кабины и кресло).

В качестве примера (табл. 1, 2) приведены данные, полученные в результате проведенного эксперимента, отражающие величину возмущающих воздействий на рабочем месте оператора при различных режимах работы ДУПМ.

Таблица 1

Значения виброускорения на рабочем месте оператора (кресло)

Режимы работы	Значения виброускорения на кресле (м/с ²)						
Холостой ход (ЩРО выключен)	0,0001	0,0002	0,0007	0,0009	0,0018	0,0049	0,0779
Холостой ход (ЩРО включен)	0,0001	0,0003	0,0044	0,0036	0,0036	0,0067	0,0641
Рабочий режим (ЩРО включен)	0,0021	0,0188	0,029	0,0172	0,032	0,538	0,0346

Таблица 2

Значения виброускорения на рабочем месте оператора (пол кабины)

Режимы работы	Значения виброускорения на полу (м/с ²)						
Холостой ход (ЩРО выключен)	0,0008	0,0009	0,0033	0,0043	0,0992	0,0696	2,0672
Холостой ход (ЩРО включен)	0,0008	0,0023	0,0294	0,0523	0,084	0,0645	1,24
Рабочий режим (ЩРО включен)	0,05538	0,2635	0,285	0,1511	0,3313	0,332	1,1772

Для того чтобы установить, является ли отличие существенным, определяется дисперсионное отношение

$$F = \frac{S_{\delta}^2}{\bar{S}^2}, \quad (1)$$

где S_{δ}^2 – оценка межгрупповой дисперсии; \bar{S}^2 – оценка внутригрупповой дисперсии [6].

Расчетное значение по первому признаку $F = 4,0127$.

Значение критерия для исходных данных эксперимента $F_T = 3,467$.

Полученные значения позволили сделать вывод о существенном влиянии режимов работы ДУПМ на величину значений виброускорения на рабочем месте оператора и необходимости их учета при составлении математической модели.

Расчетное значение по второму признаку $F = 1,4903$.

Значение критерия для исходных данных эксперимента $F_T = 3,467$.

Дисперсионный анализ влияния частоты вращения ЩРО на выходной информационный параметр позволил сделать вывод о несущественности этого влияния. Поэтому учитывать изменение числа оборотов ЩРО при составлении математической модели рабочего процесса ДУПМ как одного из факторов, влияющих на уровень вибрации на рабочем месте оператора, нет необходимости.

Расчетное значение по третьему факторному признаку $F = 4,292$.

Значение критерия для исходных данных эксперимента $F_T=3,467$.

Значения, полученные по результатам анализа третьего факторного признака, позволили сделать вывод о том, что обороты ДВС влияют на уровень динамических воздействий. Следовательно, обороты ДВС необходимо учитывать при составлении математической модели как фактора, определяющего уровень вибрации на рабочем месте оператора.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили выявить эксплуатационные параметры, которые влияют на процессы, протекающие в динамической системе «возмущающие воздействия – ДУПМ – оператор». Однофакторный дисперсионный анализ позволил исключить несущественные факторы и оставить существенные для составления математической модели ДУПМ. Полученная математическая модель даст возможность определить оптимальные параметры динамической системы, которые позволят снизить уровень вибрации на рабочем месте оператора.

Список литературы

1. Артемьев К.А. Дорожные машины: в 2 ч. Ч II. Машины для устройства дорожных покрытий. М.: Машиностроение, 1982. 396 с.
2. Челомей В.Н. Вибрации в технике: защита от вибрации и ударов: справочник в 6 т. М.: Изд-во «Машиностроение», 1981. Т.6. 456 с.
3. Корчагин П.А., Тетерина И.А. Результаты экспериментальных исследований вибрационного воздействия на оператора дорожной уборочно-подметальной машины // Вестник СибАДИ. № 2. 2015. С. 52 – 57.
4. Корчагин П.А. Математическая модель динамической системы // Вестник СибАДИ. №4. 2013. С. 91 – 95.
5. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора / пер. с англ. М.: Изд-во «Наука», 1976. 104 с.
6. Реброва И.А. Планирование эксперимента: учеб. пособие для вузов. Омск: Изд-во СибАДИ, 2010. 106 с.

Корчагин Павел Александрович, д-р техн. наук, проф., Korchagin_pa@mail.ru, Россия, Омск, Омский автотранспортный колледж,

Реброва Ирина Анатольевна, канд. техн. наук, доц., Ria-69@mail.ru, Россия, Омск, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),

Тетерина Ирина Алексеевна, асп., Teterina_ia@sibadi.org, Россия, Омск, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)

DETERMINATION PARAMETERS AFFECTING THE FUNCTIONING OF THE SYSTEM OF VIBRATION PROTECTION OPERATOR OF THE ROAD SWEEPER MACHINE

P.A. Korchagin, I.A. Rebrova, I.A. Teterina

The article presents the results of experimental research of road sweeper machine on the basis of tractor MTZ-80 in different modes. The results of one-factor dispersive analysis are presented. It identifies the key performance parameters identified and the degree of their influence on the level of on vibration the operator workplace.

Key words: vibration, vibration protection, road sweeper machine

Korchagin Pavel Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, Korchagin_pa@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk Auto transportation College,

Rebrova Irina Anatolievna, candidate of technical sciences, docent Ria-69@mail.ru, Russia, Omsk, Siberian State Automobile Academy (SibADI),

Teterina Irina Alekseevna, postgraduate, Teterina_ia@sibadi.org, Russia, Omsk, Siberian State Automobile Academy (SibADI)

УДК 621.879.445

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ГРУНТА СКРЕБКАМИ ТРАНШЕЙНОГО ЦЕПНОГО ЭКСКАВАТОРА

А.И. Демиденко, А.Б. Летопольский, Д.С. Семкин, И.К. Потеряев

Приводятся результаты экспериментальных исследований скребка новой конструкции с использованием разработанной экспериментальной установки. Исследуется изменение силы сопротивления резанию грунта скребком при изменении толщины срезаемой стружки. Полученные результаты позволили установить значение силы сопротивления грунта резанию скребка с разной формой режущей кромки. Представлено описание эксперимента и приведены графики обработанных осциллограмм.

Ключевые слова: траншейный экскаватор, рабочий орган, скребок, угол резания, осциллограмма.

Широкое применение траншейных цепных экскаваторов (ЭТЦ) в разных областях строительства требует совершенствования конструкции этих машин. Особую актуальность приобретают вопросы повышения производительности за счет применения новой конструкции скребка [1, 2], что является эффективным средством снижения энергоемкости и себестоимости разработки грунта, а, следовательно, и сроков строительства трубопровода.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории «Грунтовый канал» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» на спроектированной и изготовленной экспериментальной установке (рис. 1).

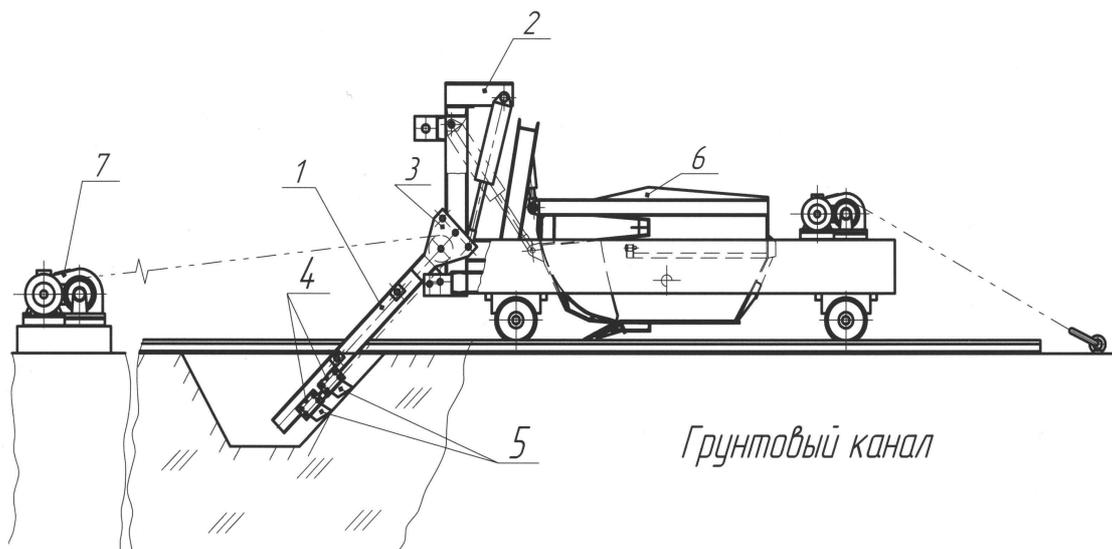


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Лабораторная установка монтируется на тензометрическую тележку 6 и состоит из двух основных частей направляющей балки 1 и тележек 4 с исследуемыми скребками 5. С одной стороны направляющая балка соединяется с гидроцилиндром подъема (опускания) балки, закрепленного на кронштейне 2, а на противоположной стороне направляющей балки находятся тележки.

Для изменения угла резания на держателях и скребках выполнены отверстия под заранее выбранным углом. Скорость резания меняется за счет привода 7, на котором установлена коробка передач. Изменение угла установки направляющей балки происходит с помощью гидроцилиндра, соединенного с направляющей балкой. На кронштейне выполнены три отверстия для крепления штока гидроцилиндра. Такое техническое решение позволяет менять угол установки направляющей балки в пределах $30 \dots 90^\circ$.

Грунтовый канал с установленными по бокам железнодорожными рельсами имеет длину 20 м, ширину 2,5 м и глубину 2 м.

Исследования проводились на супесчаном грунте со следующими характеристиками:

- 1) плотность – 1900 кг/м^3 ;
- 2) влажность – $10 \dots 12 \%$;
- 3) удельное сцепление – $0,02 \text{ МПа}$;
- 4) число ударов ударника ДорНИИ Су = 6 – 8;
- 5) угол внутреннего трения $\varphi_e = 27^\circ$, угол внешнего трения $\varphi = 23^\circ$.

В качестве объекта исследования принят скребок с различной формой режущей кромки (рис. 2).



Рис. 2. Скребки с разной формой режущей кромки

На рис. 3 показаны результаты резания грунта скребками с разной формой режущей кромки. На начальном этапе сила сопротивления резанию для трех скребков имеет одинаковое значение и составляет 120 Н. По мере движения скребков по забою выявляется разница в силе сопротивления резанию грунта ($S=0,4$ м). Для скребка со ступенчатой режущей кромкой (скребок №3) значение силы сопротивления составляет $E=288$ Н, для V-образной (скребок №2) $E=338$ Н, для полукруглой $E=398$ Н (скребок №1). В процентном соотношении эта разница говорит о том, что сила сопротивления резанию, возникающая на скребке № 1 на 38 % больше значения сопротивления для скребка № 3 и на 17 % превышает силу сопротивления, действующую на скребок № 2.

Если рассмотреть тенденцию изменения силы сопротивления резанию грунта для отдельно взятого скребка, например № 3, то в точке $S=0,2$ м сила резания составляет $E=188$ Н, в точке $S=0,4$ м возрастает до значения $E=288$ Н, что больше предыдущего значения на 53 %, а в точке $S=0,6$ м сила резания увеличилась на 30 %, по сравнению со вторым значением и составила $E=375$ Н. Интенсивность изменения силы резания на отрезке пути от 0,2 м до 0,4 м говорит о накоплении и образовании призмы грунта на скребке. Срезанный грунт, оставшийся на поверхности режущего элемента, действует как на сам скребок, так и на поверхность срезаемого грунта. Значение, до которого будет возрастать эта сила, ограничено массой грунта, оставшейся на скребке, которая будет зависеть от параметров скребка (ширина, высота, угол резания), поэтому на отметки пути $S=0,6$ м сила сопротивления копанию изменилась не пропорционально предшествующему, а только на 30 %.

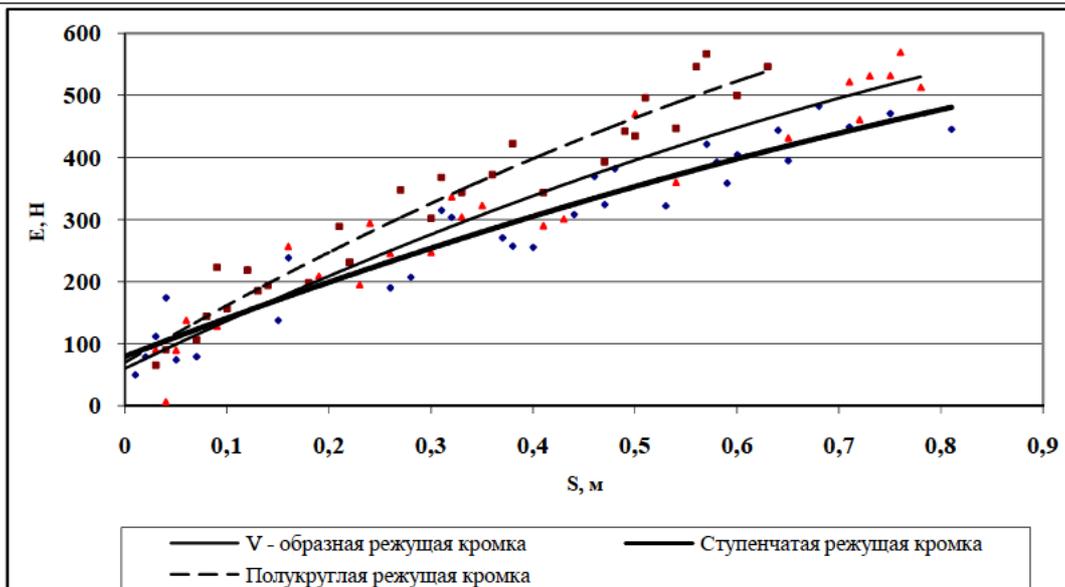


Рис. 3. Зависимость силы сопротивления копанию грунта для скрепок с разной формой режущей кромки

Эксперимент показал влияние на силу сопротивления резанию грунта формы режущей кромки и массы выносимого грунта, находящегося на скребке. Разница в полученных значениях говорит о том, что процесс разрушения грунта скребками с разной формой режущей кромки различен, и этот факт необходимо учитывать.

Для установления влияния толщины срезаемой стружки на силу сопротивления грунта резанию принят скребок со ступенчатой режущей кромкой.

Полученные осциллограммы (рис. 4), отражающие влияние толщины срезаемой стружки на процесс копания грунта, обрабатывались, и результаты обработки заносились в программу Microsoft Excel. На основании полученных данных строились линии тренда и были получены уравнения регрессии (табл. 1). Значения силы сопротивления копанию грунта, рассчитанные по уравнениям регрессии, сведены в табл. 2.

Обработка результатов исследований проводилась согласно общепринятым методикам статистической обработки данных [4].

Для изучения взаимосвязи исследуемых параметров экспериментальные данные обрабатывают на основе методов теории корреляции. Порядок нахождения корреляционных зависимостей заключается в сведении в таблицы значений исследуемых параметров, построении на их основе поля корреляции, расчете эмпирической линии регрессии и определении теоретической линии регрессии. Процесс определения теоретической линии регрессии при ограниченном числе опытов заключается в выборе и обосновании типа кривой и расчете параметров ее уравнения.

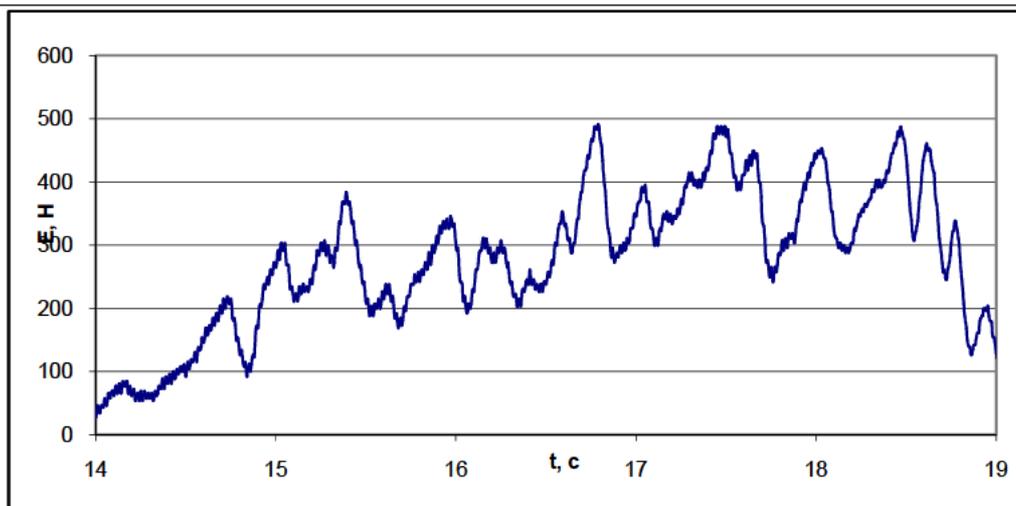


Рис. 4. Пример компьютерной осциллограммы процесса резания грунта скребком

Для большинства исследований процесса взаимодействия рабочих органов с грунтом, при которых изучается взаимосвязь между параметрами, может быть выбрана кривая параболического типа, уравнение которой в общем виде

$$y = a + bx + cx^2, \quad (1)$$

где y – ордината теоретической линии регрессии; a, b, c – параметры уравнения.

Основным методом нахождения параметров уравнения связи является метод наименьших квадратов, суть которого заключается в минимизации суммы квадратов отклонений полученных значений зависимой переменной y от ее значений, вычисленных по уравнению связи с факторным признаком [5].

Полученные компьютерные осциллограммы обрабатывались по экстремальным значениям.

Среднее арифметическое значение [5]

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^m x'_j f_j^*}{\sum_{j=1}^m f_j^*}, \quad (2)$$

где x'_j – середина интервала; f_j^* – частота попаданий результатов наблюдения x_j в заданный интервал; j – номер интервала.

Среднеквадратическое отклонение [5]

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x'_j - \bar{x})^2 f_j^*}{\sum_{j=1}^m f_j^*}}. \quad (3)$$

Проверка гипотезы о нормальном распределении состоит в том, чтобы на основании сравнения эмпирических частот с предполагаемыми (теоретическими) сделать вывод о соответствии эмпирического распределения теоретическому. Для проверки близости теоретического и эмпирического распределения используют критерий Пирсона [5]

$$\chi^2 = \sum_j \frac{(f_j^* - f_j)^2}{f_j}, \quad (4)$$

где f_j – теоретические частоты в интервале.

Теоретическая частота в данной группе [5]

$$f_j = \frac{ni}{S} p(t), \quad (5)$$

где $p(t)$ – табличное значение.

Нормированное отклонение [5]

$$t_j = \frac{(x'_j - \bar{x})}{S}. \quad (6)$$

Критическое значение Пирсона χ^2_T определяется по таблице [5] в соответствии с числом степеней свободы и уровнем значимости λ .

Таблица 1

Уравнения регрессии

Толщина стружки h, м	Уравнение регрессии	R ²
0,01	E = -139,97S ² + 288,42S + 37,315	0,9155
0,02	E = -754,34S ² + 1120,8S + 94,156	0,8959
0,03	E = -823,18S ² + 2107,3S + 148,22	0,941
0,04	E = -1598,8S ² + 3104,5S + 88,604	0,954

Таблица 2

Влияние толщины стружки на силу сопротивления резанию грунта

Сопротивление резанию грунта E, Н	Путь, м	Толщина стружки h, м			
	S	0,01	0,02	0,03	0,04
	0,1	64,72	198,69	350,72	383,07
	0,3	111,24	362,5	706,32	876,06
	0,5	146,53	465,97	996,07	1241,15
	0,75	170,62	508,01	1170,17	1517,65

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что при взаимодействии с грунтом скребка со ступенчатой режущей кромкой возникает наименьшая сила сопротивления резанию. Осциллограммы процесса резания дали информацию об изменении силы сопротивления резанию по ходу движения скребка вверх по забою траншеи. Полученные уравнения регрессии позволят рассчитать значения возникающего сопротивления в любой точке пути скребка вдоль забоя траншеи.

Список литературы

1. А.с. № 240540 СССР, МКИ Е 02 f 5/06. Режущий элемент скребкового типа для траншейных экскаваторов / Э.А. Джангулян, Н.В. Кареев, М.Н. Лебедев, В.П. Успенский, Э.Н. Шкневский, А.-О. И. Суурпере, Х.-Э. Э. Виирок и Р.В. Веерус (СССР). № 1011530/29-14; заявл. 10.06.1965; опубл. 21.03.1969. Бюл. № 12. 2 с.

2. А.с. № 628244 СССР, МКИ Е 02 F 5/10. Рабочий орган экскаватора-дреноукладчика / В.И. Миронов, А.А. Коршиков и А.В. Федирко (СССР). № 2485635/29-03; заявл. 11.05.1977; опубл. 15.10.1978. Бюл. № 38. 3 с.

3. Демиденко А.И., Летопольский А.Б. Теоретические исследования взаимодействия скребка траншейного цепного экскаватора с грунтом // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. Вып. 3 (21). С. 5 – 11.

4. Красовский Г.И., Планирование эксперимента: монография. Филаретов Г.Ф. Минск: БГУ, 1982. 302 с.

5. Реброва И.А. Планирование эксперимента: учеб. пособие. Омск: СибАДИ, 2010. 106 с.

Демиденко Анатолий Иванович, канд. техн. наук, проф., antooooon-85@mail.ru, Россия, Омск, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),

Летопольский Антон Борисович, канд. техн. наук, antooooon-85@mail.ru, Россия, Омск, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),

Семкин Дмитрий Сергеевич, канд. техн. наук, D.S.Semkin@yandex.ru, Россия, Омск, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),

Потеряев Илья Константинович, канд. техн. наук, ilya_poter@mail.ru, Россия, Омск, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PROCESS OF CUTTING THE SOIL SCRAPER CHAIN TRENCH EXCAVATOR

A.I. Demidenko, A.B. Letopolsky, D.S. Semkin, I.K. Poteryaev

The results of experimental studies wiper new design, using developed experimental setup. Explore etsya change of the resistance to cutting scraper soil cut by changing the thickness of the chips. The results obtained are set to allow the soil cutting resistance force with different shape of the scraper blade edge. The article presents a description of the experiment and the graphs processed oscillatorgram.

Key words: trenchers, working body, scraper, cutting angle-of, waveform.

Demidenko Anatoly Ivanovich, candidate of technical sciences, professor, antooooon-85@mail.ru, Russia, Omsk, Siberian State Automobile Academy (SibADI),

Letopolsky Anton Borisovich, candidate of technical sciences, antooooon-85@mail.ru, Russia, Omsk, Siberian State Automobile Academy (SibADI),

Semkin Dmitry Sergeevich, candidate of technical sciences, antooooon-85@mail.ru, Russia, Omsk, Siberian State Automobile Academy (SibADI),

Poteryaev Ilya Konstantinovich, candidate of technical sciences, antooooon-85@mail.ru, Russia, Omsk, Siberian State Automobile Academy (SibADI)

УДК 621.94-29:658.512

СОЗДАНИЕ ТРЁХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ПЛОСКОГО НЕЭВОЛЬВЕНТНОГО ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА С КРУГОВЫМИ ЗУБЬЯМИ В КОМПАС-3D

Е.Н. Валиков, А.Л. Попов

Описана методика проектирования плоско-цилиндрических зубчатых передач с круговым профилем зуба в среде трёхмерного проектирования Компас-3D. Приведены этапы их проектирования.

Ключевые слова: твердотельное моделирование, арочный профиль зуба, плоское зубчатое колесо, проектирование.

Компас-3D – система твердотельного моделирования. Это означает, что процесс построения модели состоит из последовательного добавления или удаления материала в результате перемещения в пространстве трёхмерного поля электронного геометрического объекта, «эскиза», (вращение вокруг оси, выдавливания перпендикулярно плоскости эскиза, перемещение по траектории и пр.). На рис. 1 показано создание твердотельной 3D-модели кругового цилиндра: путём вращения плоскости ABCD вокруг оси AD (рис. 1, а), перемещением круга с радиусом R вдоль оси $O_1 O_2$ (рис. 1, б); перемещением круга с радиусом R вдоль криволинейной траектории $O_1 O_2$ в виде сплайна.

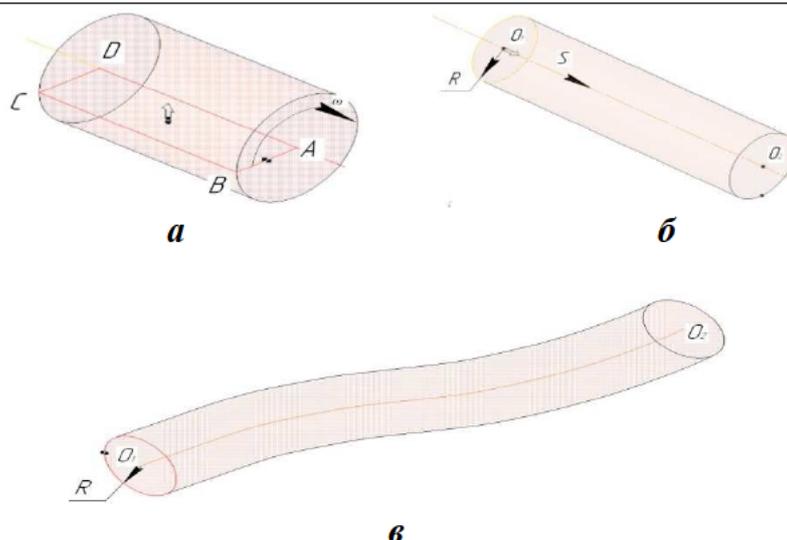


Рис. 1. Примеры создания твердотельной 3D-модели:
а – вращением плоскости $ABCD$ вокруг оси AD ; **б** – перемещением круга радиусом R вдоль оси $O_1 O_2$; **в** – перемещением круга, радиусом R вдоль криволинейного стержня по траектории $O_1 O_2$ в виде сплайна

При выполнении большинства операций моделирования используются несколько вариантов построения:

вращение (удаление материала);

вырезание элемента (удаление материала внутри замкнутой поверхности, сформированной по замкнутому эскизу и типу перемещение-выдавливанию, вращению и т. д.);

перемещение элементов (удаление материала детали, находящейся сверх поверхности, которая сформирована в результате операции);

приклеивание (добавление материала);

объединение (добавляемый элемент соединяется с твёрдым телом, с которым он пересекается).

В зависимости от конкретной задачи выбирается оптимальный из возможных способов создания модели. Например, для построения цилиндрической полости в твердотельной 3D-модели можно использовать удаление материала при перемещении эскиза в форме круга по оси $O_1 O_2$ (рис. 2, а), вращение плоскости $ABCD$ вокруг оси AD (рис. 2, б); поступательном перемещении твердотельной 3D-модели инструмента (рис. 2, в).

Формирование сложных фасонных изделий представляет собой сложную техническую задачу. Для определения параметров производящей поверхности могут быть использованы:

- 1) кинематический метод анализа процесса формообразования [1];
- 2) профилирование методами дифференциальной геометрии [2, 3];
- 3) графокинетический метод профилирования [4];
- 4) объектное проектирование в обобщённых параметрах [5].

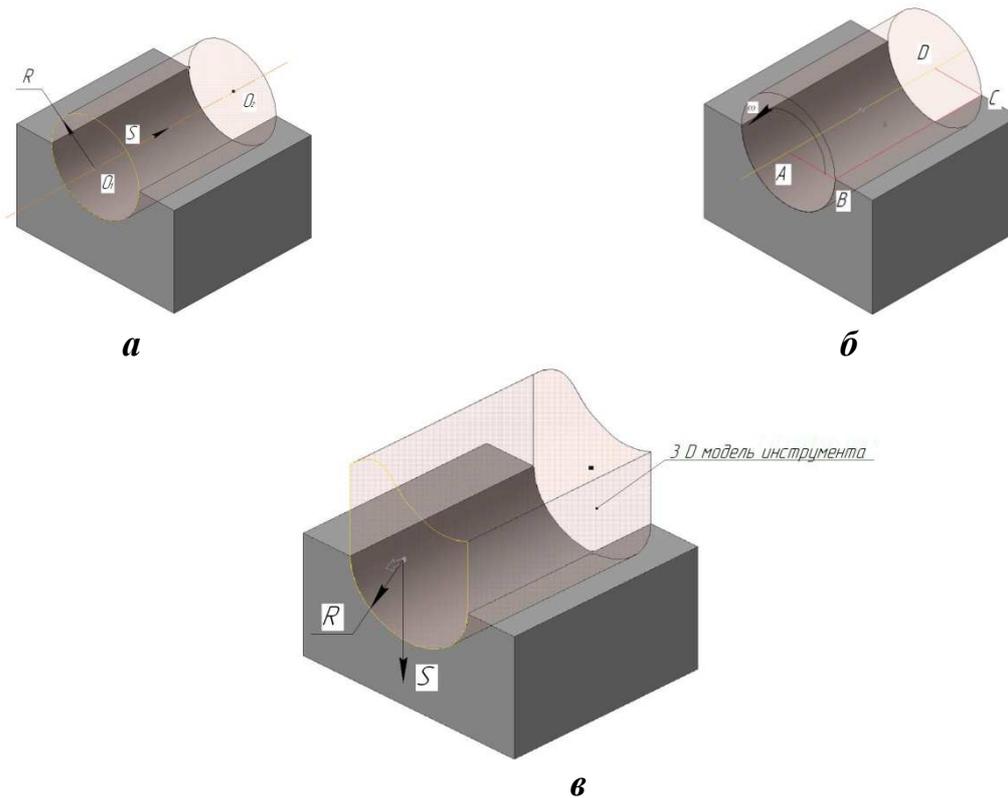


Рис. 2. Создание модели цилиндрической полости в твердотельной 3D-модели: а – эскиза в виде круга; б – вращением эскиза в виде плоскости; в – поступательным движением 3D-модели инструмента

Авторами предложена методика создания твердотельных 3D-моделей сопряжённых поверхностей.

Построение твердотельной 3D-модели плоского неэвольвентного зубчатого колеса с круговыми зубьями может быть реализовано функциональными возможностями программы Компас-3D по следующей методике.

1. Создаётся твердотельная 3D-модель инструмента в соответствии с чертежом (рис. 3).
2. Строится твердотельная 3D-модель заготовки для плоского зубчатого колеса в соответствии с чертежом, изображённым на рис. 4.
3. Создаётся передача, состоящая из твердотельных 3D-моделей инструмента и заготовки плоского колеса в соответствии со схемой, приведённой на рис. 5.

Давая приращение по углу поворота инструмента на угол $\Delta\varphi_1$ и соответствующего ему углу поворота заготовки колеса на угол $\Delta\varphi_2 = \frac{z_1}{z_2} \Delta\varphi_1$,

создаём имитацию согласованного дискретного вращения звеньев передачи. От тела заготовки отсекается трёхмерный элемент, соответствующий

площади пересекаемых трёхмерных моделей инструмента и заготовки колеса. Формообразование одной впадины между зубьями происходит в пределах между углами контакта от φ_{2H} до φ_{2K} . Для формообразования всех зубьев необходимо осуществить поворот заготовки на 360 градусов.

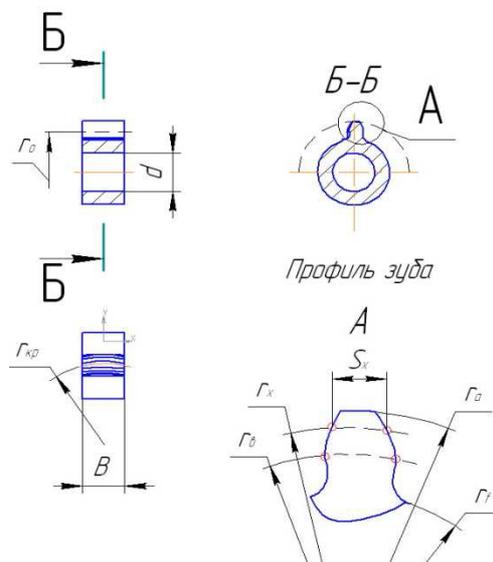


Рис. 3. Чертёж твердотельной 3D-модели инструмента для формообразования плоского зубчатого колеса

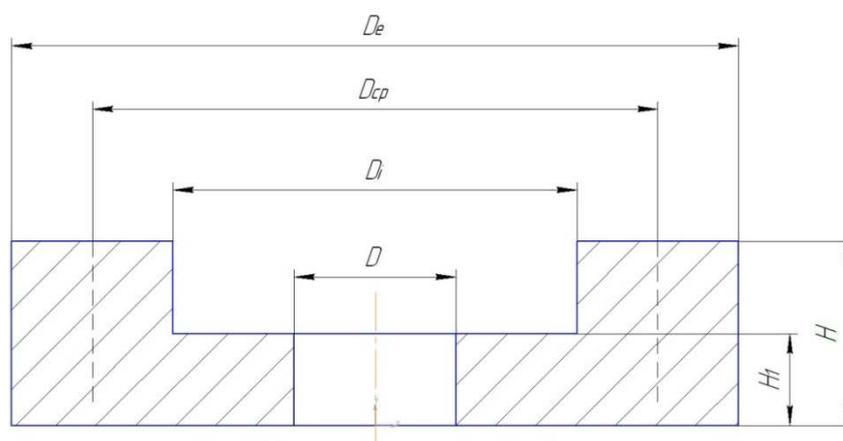


Рис. 4. Чертёж твердотельной 3D-модели заготовки для плоского зубчатого колеса

Предложенная методика построения трёхмерной электронной модели плоского неэвольвентного зубчатого колеса с круговыми зубьями реализована при создании твердотельной модели плоского зубчатого колеса с круговыми зубьями, модулем $m = 2 \text{ мм}$, числом зубьев $z = 36$, $R_e = 42 \text{ мм}$, $R_i = 30 \text{ мм}$. В качестве инструмента использовалась твердотельная 3D-модель с параметрами $m = 2 \text{ мм}$, числом зубьев $z = 11$, $R_{кр} = 18 \text{ мм}$.

На рис. 6 представлено изображение электронной 3D-модели плоского зубчатого колеса с круговыми зубьями.

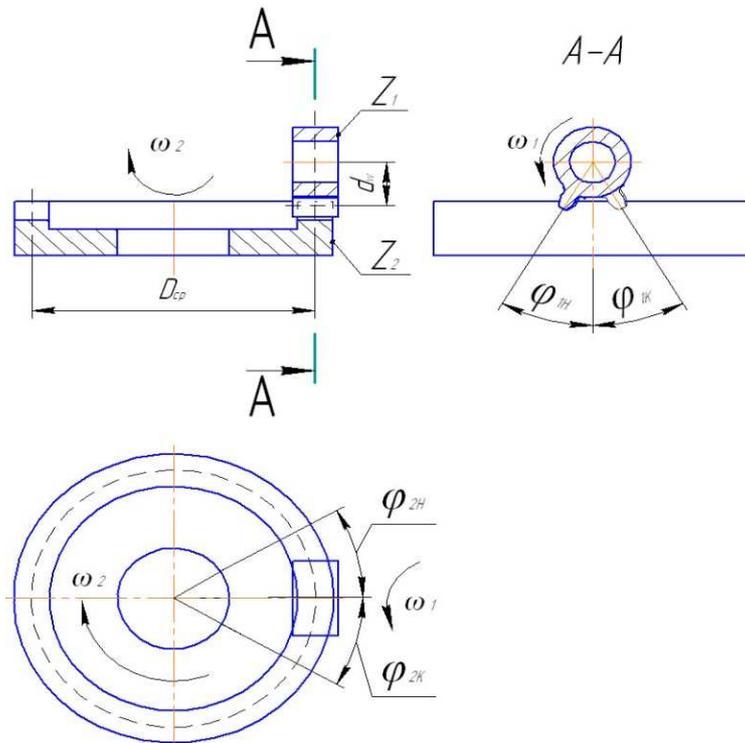


Рис. 5. Схема передачи, состоящей из твердых 3D-моделей инструмента и заготовки плоского колеса



Рис. 6. Твердая 3D-модель плоского зубчатого колеса с круговыми зубьями

Предложенная методика создания твердотельных 3D моделей с использованием функциональных возможностей программы Компас 3D может быть использована при решении различных задач проектирования инструментов, работающих по методу обкатки.

Список литературы

1. Шишков В.А. Орбазование поверхностей резанием по методу обкатки. М.: Машгиз, 1951. 152 с.
2. Давыдов Я.С. Неэвольвентное зацепление. М.: Машгиз, 1950. 180 с.
3. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. М.: Наука, 1968. 584 с.
4. Хандожко А.В. Особенности проектирования режущих инструментов с учётом этапов жизненного цикла // Известия Тульского государственного университета. Вып. 1. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2005.
5. Калашников Д.Б. Применение современных компьютерных технологий для проверки на прочность зубьев плоскоколёсных передач // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. 2007. Т 9. №3. С. 725 – 728.

Валиков Евгений Николаевич, д-р техн. наук, проф., Valikoven@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Попов Александр Леонидович, асп., Shurup_89@inbox.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

CREATING A THREE-DIMENSIONAL MODEL OF A FLAT, NOT INVOLUTE GEAR WHEELS WITH ARCHED PROFILE IN KOMPAS-3D

E.N. Valikov, A.L. Popov.

The technique of design a flat-cylindrical gears with the arch profile in three-dimensional design environment, Kompas-3D is described. The stages of their design are given.

Key words: solid modeling, arch tooth profile, flat gear, design.

Valikov Eugene Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Valikoven@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Popov Alexander Leonidovich, postgraduate, Shurup_89@inbox.ru, Russia, Tula, Tula State University

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

- Ларин С.Н., Платонов В.И., Куприн Е.П., Яковлев С.С. (мл.)*
Подход к оценке повреждаемости при деформировании стрингерных конструкций с цилиндрическими каналами по различным теориям ползучести и повреждаемости 3
- Пасынков А.А.*
Исследования энергосиловых параметров высадки концов трубных заготовок в изотермических условиях 15
- Бессмертная Ю.В., Яковлев Б.С., Малышев А.Н.*
К оценке силовых режимов операции изотермической вытяжки квадратных коробок из высокопрочных анизотропных материалов 24
- Чудин В.Н., Пасынков А.А., Нуждин Г.А.*
Изотермическая отбортовка заготовок из анизотропных материалов в режиме вязкопластичности 34
- Ремнев К.С., Трегубов В.И., Осипова Е.В.*
Оценка компонент скоростей деформации в очаге деформации при ротационной вытяжке цилиндрических деталей коническим роликом 42

ВОЕННО-СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ

- Курков С.Н., Куканов С.А., Зайцев Ю.М.*
Применение наноструктурируемых материалов в защитных композициях средств индивидуальной бронезащиты 53
- Гуров С.В.*
Историко-технические этапы совершенствования реактивной артиллерии в России..... 59

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- Тулупов В.Д., Ле Суан Хонг*
Тягово-энергетический рейтинг вагонов метрополитена с альтернативными системами тягового электропривода 70

<i>Гужов С.В.</i> Внедрение системы энергетического менеджмента как принцип управления затратами на действующих электротехнических комплексах	79
--	----

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

<i>Рубцов И.Н.</i> Результаты полевых испытаний разработанного автоматического кольцевого дендрометра с цифровым измерительным элементом	90
---	----

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА,
ОБРАБОТКА И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ**

<i>Тарасян В.С., Дмитриев Н.В.</i> Сравнение методов сегментации пикселей топографических карт по типам объектов	97
---	----

<i>Селищев В.А., Голубничая Я.Р.</i> Основные защитные признаки банкнот: публичные элементы	106
--	-----

<i>Палто В.С., Кабанов С.М., Фридлендер Г.В.</i> Разработка программного комплекса и имитационной математической модели АПТ для загрузки-выгрузки углеводородного сырья на танкерные суда без динамического позиционирования	114
---	-----

<i>Голубничая Я.Р., Селищев В.А.</i> Производство банкнот	124
--	-----

<i>Малахов И.И., Суковин М.В.</i> Реализация в программном комплексе математической модели «микрорельеф – ходовое оборудование» с целью создания виброзащиты	135
---	-----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Борискин О.И., Стаханов Н.Г., Хлудов С.Я., Якушенков А.В., Горынина И.В.</i> Анализ точности профиля эвольвентных червячных фрез с твердосплавными СМП	143
--	-----

<i>Маликов А.А., Сидоркин А.В.</i> Особенности многоканального измерения и регистрации температуры в процессе шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес	149
<i>Дударев А.С.</i> Акустический анализ параметров звукопоглощающих конструкций	156
<i>Попов И.В., Толмачев П.В., Хмелев Р.Н.</i> Виртуальный стенд для снятия статических и динамических характеристик двигателей внутреннего сгорания	164
<i>Гилязова В.Р., Орловская Н.Ф., Цыганкова Е.В.</i> Эффективность действия депрессорно-диспергирующих присадок для низкозастывающих дизельных топлив	170
<i>Загривный Э.А., Поддубный Д.А.</i> Буровой снаряд на грузонесущем кабеле с бездатчиковым управлением авторезонансным электроприводом возвратно-вращательного движения	178
<i>Дударев А.С., Свирицёв В.И.</i> Оценка температурного поля при алмазном сверлении полимерных композиционных материалов	188
<i>Агафонов Е.Д., Ващенко Г.В.</i> Имитационная эвристическая модель магистрального нефтепровода	195
<i>Куликов Н.И., Макаренко А.В., Сорокин А.Е.</i> Источники питания мехатронных модулей автономных мобильных объектов	203
<i>Савельев С.В., Бурый Г.Г., Потеряев И.К., Белодед А.С.</i> Применение инновационного устройства контроля качества уплотнения грунта дорожно-строительной машиной «каток».....	212
<i>Белов Д.Б., Масенков Е.В.</i> Использование методологии FMEA применительно к оценке качества системы централизованного водоснабжения	217

<i>Орловская Н.Ф., Рубцов И.Н.</i> Неразрушающий контроль свойств пластовой нефти Ванкорского месторождения	224
<i>Плахотникова Е.В.</i> Результаты исследования систем «электропривод – запорная арматура» с позиции технической эффективности и энергопотребления	230
<i>Барулина К.А., Елистратова О.В., Кондратов Д.В., Кондратова Ю.Н., Кузнецова Е.Л.</i> Построение математических моделей гидроупругости трех соосных оболочек, свободно опертых по концам, взаимодействующих с вязкими несжимаемыми жидкостями в условиях вибрации и давления	237
<i>Корчагин П.А., Реброва И.А., Тетерина И.А.</i> Определение параметров, влияющих на функционирование системы виброзащиты оператора дорожной уборочно- подметальной машины	249
<i>Демиденко А.И., Летопольский А.Б., Семкин Д.С., Потеряев И.К.</i> Экспериментальные исследования процесса резания грунта скребками траншейного цепного экскаватора	256
<i>Валиков Е.Н., Попов А.Л.</i> Создание трёхмерной модели плоского незвольвентного зубчатого колеса с круговыми зубьями в КОМПАС-3D	263

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 3

Редактор С.Г. Лихачева

Компьютерная правка и верстка М.С. Шевкова, Б.С. Яковлева

Учредитель:

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97

Подписано в печать 21.03.16. Дата выхода в свет 25.03.16

Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная

Усл. печ. л. 15,9. Уч.-изд. л. 13,7

Тираж 500 экз. Заказ 076

Цена свободная

Тульский государственный университет

300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Отпечатано в Издательстве ТулГУ

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95