

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

2025

INDUSTRIAL POWER ENGINEERING





ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Ежемесячный производственно-технический журнал

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНЭНЕРГО РОССИИ, ПАО «ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕЭС»,
КОРПОРАЦИЯ «ЕДИНЫЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС», НТФ «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»,
НП «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ ЕЭС»

6

Июнь
2025

Издается с августа 1944 года

Москва, НТФ «Энергопрогресс»

95 ЛЕТ НИУ «МЭИ»

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Дюдяков А. А., Янченко С. А. Разработка алгоритма управления гибридного фильтра высших гармоник

4

Гришин С. Э., Анучин А. С., Демидова Г. Л., Горбунов Н. М., Кулик Е. С., Хао Чен. Определение точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля для мультисканального стринг-инвертора с помощью короткого замыкания

11

Попов С. К., Валинеева А. А., Свистунов И. Н. Моделирование теплообмена в барабанном реакторе с косвенным обогревом

20

Глазов В. С. Направления повышения эффективности высокотемпературных теплотехнологических установок

29

Арбатский А. А., Мечник Д. А., Горелов М. В., Анкудинов А. С. Исследование зависимости КПД роторного теплового утилизатора вытяжного воздуха систем вентиляции от скорости его вращения

37

Четвериков А. Е., Солдатов И. М., Хвостова М. С., Солдатов А. И. Анализ характеристик и инновационных решений активных зон ядерных реакторов малой мощности

46

ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

Кожеченко А. С., Щербаков А. В. О разработке систем управления термоэлектрическими установками для охлаждения жидких теплоносителей

57



Российская Академия Наук

Уважаемые друзья!

Рад поздравить вас со знаменательной датой — 95-летием со дня основания Московского энергетического института, который по праву является ведущим вузом в области энергетики и электротехники в нашей стране.

Энергетика — как основа промышленного развития государства — всегда нуждалась и сегодня нуждается в высококвалифицированных специалистах, способных не только осуществлять техническое обслуживание объектов, но и вести научную работу, внедрять результаты научных исследований.

Отрадно, что с задачей подготовки таких специалистов МЭИ справляется достойно. В числе его выпускников — немало учёных, талантливых энергетиков, организаторов отрасли. Сегодня в Национальном исследовательском университете «МЭИ» бережно хранятся и приумножаются профессиональные традиции, развиваются новые формы обучения, расширяется спектр направлений подготовки. Здесь сформирован уникальный профессорско-преподавательский коллектив, частью которого являются и академики и члены-корреспонденты Российской академии наук. Ваш вуз активно взаимодействует с международными научными организациями, организует значимые для профессионального сообщества научно-практические конференции. Такая работа, безусловно, способствует обеспечению энергетической безопасности России, укреплению кадрового потенциала отечественной энергетической отрасли. Помогает нашей стране — добиваться новых, ярких результатов.

В этот знаменательный день хотел бы пожелать коллективу Национального исследовательского университета «МЭИ», всем студентам и выпускникам Университета дальнейших успехов, реализации научного, творческого потенциала.

Президент РАН
академик РАН

Г.Я. Красников



**ГОСУДАРСТВЕННАЯ ДУМА
ФЕДЕРАЛЬНОГО СОБРАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОСЬМОГО СОЗЫВА
КОМИТЕТ ПО ЭНЕРГЕТИКЕ**

**Ректору НИУ «МЭИ»
Н.Д. РОГАЛЕВУ,
сотрудникам и студентам**

Уважаемый Николай Дмитриевич, коллеги, друзья!

Поздравляю вас со знаменательной датой - 95-летием со дня основания вуза!

Национальный исследовательский университет «МЭИ» неспроста считается одним из ведущих высших учебных заведений, готовящих кадры для отечественного ТЭК, одной из опорных отраслей экономики нашего государства. С первых дней своего существования и по сей день здесь работают высококвалифицированные преподаватели, хорошо знающие свое дело, неравнодушные, стремящиеся расширить свои знания и передать их студентам. Кроме того, в МЭИ преподают и действующие сотрудники энергетических предприятий, которые делятся своим практическим опытом с молодежью.

Высоко оцениваются научные достижения коллектива университета в различных отраслях науки. В МЭИ работают не просто выдающиеся ученые и талантливые исследователи, но люди увлеченные, не пасующие перед сложными задачами. Благодаря целенаправленной политике руководства постоянно происходит обновление и расширение учебных и научных лабораторий, они оснащаются современным оборудованием.

Особо подчеркну международное признание МЭИ как высококлассного учебного заведения, обеспечившего формирование технической интеллигенции для многих зарубежных государств. В настоящее время в МЭИ учатся студенты из многих стран ближнего и дальнего зарубежья. Созданы и работают филиалы НИУ «МЭИ» в Таджикистане и Узбекистане. Активно взаимодействуют с институтом 79 вуза-партнеров в науке и образовании.

Сегодня перед российской энергетикой стоят серьезные вызовы в области повышения эффективности, внедрения новейших технологий, достижения технологического суверенитета. Их преодоление невозможно без соответствующего кадрового обеспечения. Ваша задача - дать отрасли высококвалифицированных, эрудированных, способных к самосовершенствованию и развитию специалистов. Уверен, НИУ «МЭИ» с этой задачей справится.

В день 95-летия со дня основания Московского энергетического института хочу пожелать всем его работникам, выпускникам и студентам дальнейших успехов в подготовке инженерных и научных кадров для нашей энергетики, достижения новых высот в науке и инновациях, признания и благополучия!

**Председатель Комитета
Государственной Думы по энергетике**

Н.Г. Шульгинов



ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

DOI: 10.71759/70kb-r863

Специальность 2.4.2. Энергетика и электротехника

Разработка алгоритма управления гибридного фильтра высших гармоник

Дюдяков А. А., аспирант, Янченко С. А., доктор техн. наук
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», Москва

Приведены результаты теоретической и экспериментальной апробации алгоритма управления гибридного фильтра высших гармоник по методу расширенного фильтра Калмана. Несмотря на более высокую вычислительную нагрузку, предложенный метод управления демонстрирует хорошую эффективность компенсации гармонической эмиссии тока нелинейной нагрузки в условиях низкого уровня качества электроэнергии, что выгодно отличает его в сравнении с применяемыми в настоящее время типовыми методами управления, включая методы pq - и dq -регулирования.

Ключевые слова: гибридный фильтр, высшие гармоники, нелинейная нагрузка, качество электроэнергии.

Гибридные фильтры (ГФ) высших гармоник (ВГ) являются эффективным средством подавления гармонической эмиссии мощных нелинейных нагрузок, обеспечивая комплексную компенсацию изменяющихся уровней несинусоидальности тока при сравнительно низких финансовых затратах. Комбинация мощных пассивных индуктивно-емкостных фильтров, настроенных на основные гармоники источника искажений, с маломощным активным преобразователем, осуществляющим регулирование добротности и компенсацию аномальных или неканонических ВГ [1], представляет собой выгодную альтернативу дорогостоящим устройствам активной фильтрации.

Тем не менее, наличие в составе ГФ активного преобразователя, подверженного влиянию внешних параметров питающей сети, обуславливает зависимость эффективности ГФ от качества электроэнергии (КЭ) питающей сети, по аналогии с типовыми активными фильтрами (АФ) [2]. В условиях работы в сетях с высокой концентрацией нелинейных нагрузок входные сигналы системы управления активного преобразователя АФ или ГФ могут содержать недопустимые уровни помех, критически

снижающие эффективность компенсации искажений.

Типовые алгоритмы управления, применяемые в настоящее время в АФ, по способу определения спектра компенсируемой нелинейной нагрузки можно подразделить на алгоритмы временной и частотной областей [2].

Суть алгоритма компенсации во временной области заключается в обработке сигнала компенсируемого тока нагрузки с целью выделения в нем суммарного тока всех ВГ: для этого измеряемые токи из стандартной трехфазной неподвижной abc системы координат (СК) преобразуются в ортогональные неподвижную $\alpha\beta$ или вращающуюся dq СК. В этих СК искомым суммарный ток ВГ проявляется в виде переменной составляющей анализируемого сигнала и может быть легко выделен с помощью стандартных высокочастотных фильтров. Данный подход применяется в наиболее распространенных алгоритмах управления АФ и ГФ по методам pq -, dq -регулирования [3], а также в более сложных алгоритмах pqr - [4] и кросс-векторного регулирования [5].

Алгоритмы компенсации в частотной области предполагают определение полного гармонического спектра измеряемого сигнала с помощью стандартных методов разложения

на спектральные составляющие типа преобразования Фурье [1] или Вейвлет-преобразования [6]. При этом может быть обеспечена селективная компенсация отдельных ВГ тока, что позволяет более эффективно использовать ограниченную мощность АФ.

Значительная вычислительная нагрузка алгоритмов управления в частотной области ограничивает их распространение в устройствах АФ и ГФ, которые в настоящее время в основном строятся на основе методов определения тока ВГ во временной области, в частности на основе pq - и dq -регулирувания [2].

Тем не менее, несмотря на простоту и теоретически высокую эффективность в условиях «идеальной» электрической сети, данные методы управления ГФ существенно снижают качество фильтрации ВГ тока нелинейной нагрузки в условиях реальных сетей с низким уровнем КЭ [2]. Это обуславливает поиск и разработку альтернативных способов управления ГФ.

Данная статья содержит краткое теоретическое описание, а также результаты компьютерного моделирования и экспериментальной апробации перспективного алгоритма управления ГФ по методу расширенного фильтра Калмана, обеспечивающего высокое качество подавления гармонической эмиссии нелинейных нагрузок в условиях реальной электрической сети, что выгодно отличает предлагаемый метод управления ГФ от применяющихся в настоящее время.

Теоретическое описание алгоритма управления гибридного фильтра по методу расширенного фильтра Калмана

Использование фильтра Калмана позволяет с высокой точностью и скоростью оценить гармонический состав измеряемого сигнала $Z(t)$, определив итерационным методом вектор состояния $\mathbf{x}(t)$, содержащий амплитуды и фазовые углы соответствующих ВГ:

$$\mathbf{x}(t) = [I_{m1}, I_{m2}, \dots, I_{m,i}, \omega, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i]^T. \quad (1)$$

В момент времени t вектор гармоник $\mathbf{x}(t)$ определяется на основе данных расчета на предыдущем шаге $t-1$ в результате решения системы уравнений:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t-1) + \mathbf{G}(t) \cdot [z(t) - h(\mathbf{x}(t-1))]; \quad (2)$$

$$\mathbf{G}(t) = \mathbf{P}(t) \cdot \mathbf{H}(t)^T \cdot (\mathbf{H}(t) \cdot \mathbf{P}(t) \cdot \mathbf{H}(t)^T + \mathbf{R})^{-1}; \quad (3)$$

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t-1) - \mathbf{G}(t) \cdot \mathbf{H}(t) \cdot \mathbf{P}(t-1) + \mathbf{Q}, \quad (4)$$

где $\mathbf{G}(t)$ — матрица коэффициентов усиления значений ошибки; $\mathbf{P}(t)$ — ковариационная матрица ошибки; \mathbf{R} , \mathbf{Q} — матрицы, характеризующие уровень шума измеряемого сигнала $z(t)$; $h(\mathbf{x}(t)) = \sum I_{m,i} \sin(i\omega t + \varphi_i)$ — представление во временной области сигнала, определяемое на основе рассчитываемой оценки спектра $\mathbf{x}(t)$; $\mathbf{H}(t)$ — матрица частных производных, вычисляемая по формуле

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(t) &= \partial h(\mathbf{x}(t-1)) / \partial \mathbf{x}(t-1) = \\ &= [\sin(\omega t + \varphi_1), \sin(2\omega t + \varphi_2), \dots, \\ &\quad \sin(i\omega t + \varphi_i), 1, \\ &\quad I_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1), I_{m2} \cos(2\omega t + \varphi_2), \dots, \\ &\quad I_{m,i} \sin(i\omega t + \varphi_i)]^T. \end{aligned} \quad (5)$$

Решение системы (2) – (4) на каждом временном шаге в течение периода анализируемого сигнала $z(t)$ позволяет получить точную оценку соответствующего гармонического спектра, найдя вектор состояния $\mathbf{x}(t)$, и далее сформировать общую структуру схемы управления ГФ по методу расширенного фильтра Калмана (рис. 1, а).

В соответствии с разработанным алгоритмом фазный ток компенсации на выходе ГФ $I_{ГФ}$ определяется как сумма составляющей тока заряда конденсаторов звена постоянного тока (ЗПТ) инвертора I_3 с составляющей суммарного тока ВГ нелинейной нагрузки $I_{НГ}$ (рис. 1, а):

$$I_{ГФ} = I_3 + I_{НГ} = I_{pi} \sin(\omega t + \pi/2 + \varphi_C) + (I_{НН} - I_{Н1}) \sin(\omega t + \varphi_{Н1}), \quad (6)$$

где I_{pi} — сигнал ошибки ПИ-регулятора, контролирующего уровень напряжения ЗПТ $U_{ЗПТ}$ в соответствии с уставкой $U_{ЗПТ*}$; U_{m1C} и φ_C — амплитуда и фазовый угол 1-й гармоники сетевого фазного напряжения, определяемые с помощью фильтра Калмана на основе измеряемой кривой напряжения $u_C(t)$; $I_{Н1}$ и $\varphi_{Н1}$ — амплитуда и фазовый угол 1-й гармоники фазного тока нелинейной нагрузки, определяемые с помощью фильтра Калмана и позволяющие найти суммарный ток ВГ $I_{НГ}$.

Эффективность разработанной системы управления на основе расширенного фильтра Калмана оценивалась в рамках теоретического моделирования работы стандартной конфигурации ГФ с последовательным подключением пассивной и активной частей [7] на типовую нелинейную нагрузку в виде мостового

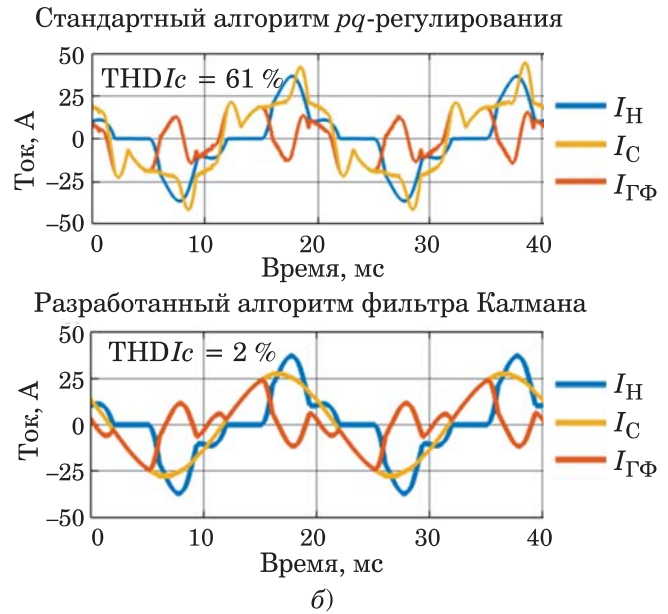
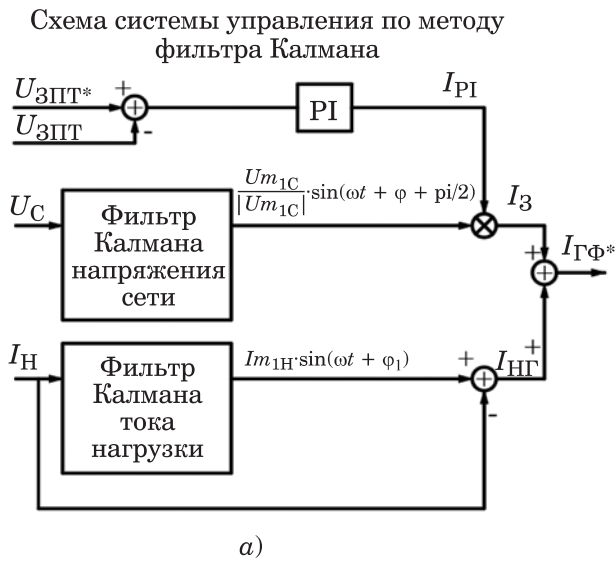


Рис. 1. Система управления ГФ на базе метода расширенного фильтра Калмана (а) и результаты моделирования работы ГФ (б)

Таблица 1

Параметры разработанной модели ГФ и нелинейной нагрузки

Питание через сетевой трансформатор			Звено постоянного тока инвертора ГФ		Пассивная часть ГФ			Нелинейная нагрузка 10 кВт		
k_{2U} , %	S , кВ·А	u_k , %	$U_{зпт*}$, В	$C_{зпт}$, мФ	$C_{пф}$, мкФ	$L_{пф}$, мГн	$R_{пф}$, Ом	C_{DC} , мФ	L_{DC} , мГн	R_{DC} , Ом
4	160	4,5	200	6,8	110	2	0,1	2	0,36	26

6-пульсного преобразователя. Параметры соответствующей Simulink-модели приведены в табл. 1.

В рамках анализа сравнивались уровни гармонических искажений результирующего сетевого тока I_C при компенсации ВГ нагрузки с помощью ГФ в условиях низкого уровня КЭ (уровень несимметрии напряжения по обратной последовательности 4 %) при использовании стандартного алгоритма управления на основе pq -регулирования и разработанного алгоритма на основе расширенного фильтра Калмана (рис. 1, б). Из представленных на рис. 1 моделируемых осциллограмм сетевого тока I_C следует, что стандартный алгоритм pq -регулирования в условиях низкого КЭ резко снижает эффективность компенсации в результате искажения сигналов управления [7], что является общей особенностью методов управления АФ и ГФ во временной области. В отличие от данных методов, разработанный алгоритм на основе расширенного фильтра

Калмана не снижает эффективность компенсации ВГ в условиях несимметрии напряжения (см. рис. 1, б), обеспечивая синусоидальную форму сетевого тока I_C благодаря корректному определению спектра тока ВГ нелинейной нагрузки.

Экспериментальная оценка эффективности алгоритма управления ГФ на основе расширенного фильтра Калмана

Экспериментальная апробация алгоритма управления ГФ в условиях электрической сети проводилась с помощью разработанного прототипа (рис. 2), состоящего из:

пассивной части в виде узкополосного индуктивно-емкостного фильтра, настроенного на частоту 300 Гц;

активной части в виде трехфазного мостового IGBT-инвертора напряжения, система управления которого программируется с помо-

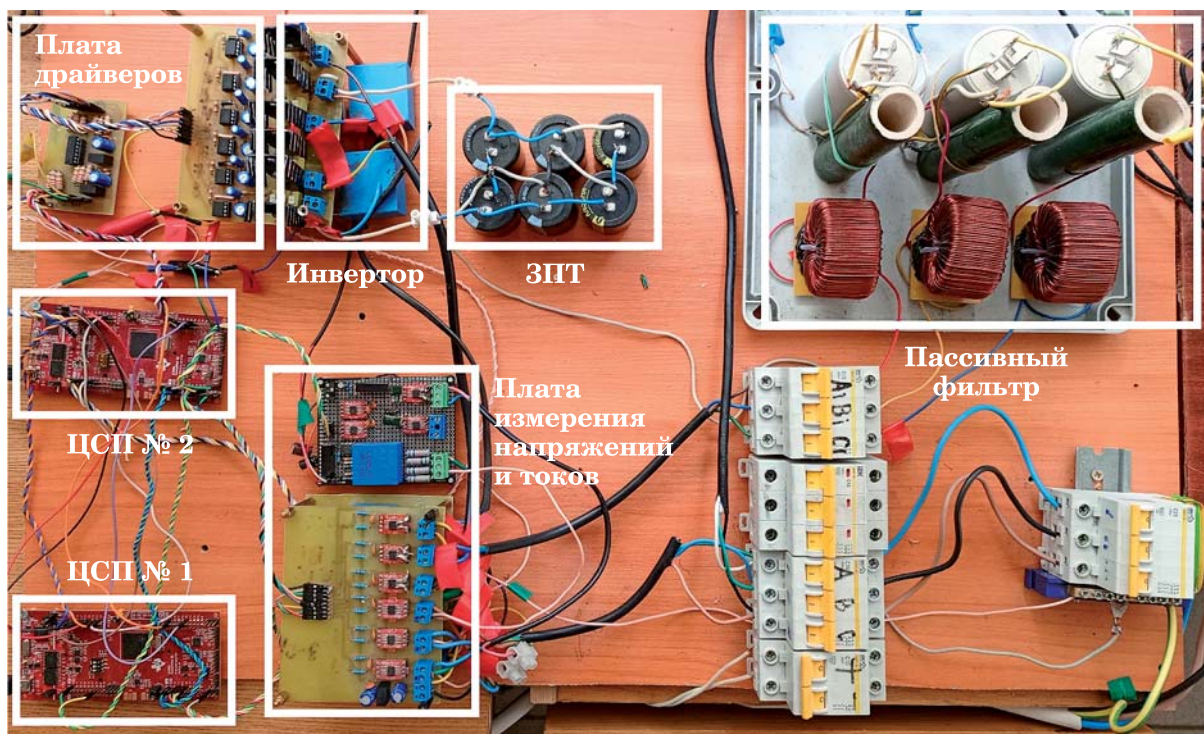


Рис. 2. Общий вид разработанного прототипа ГФ

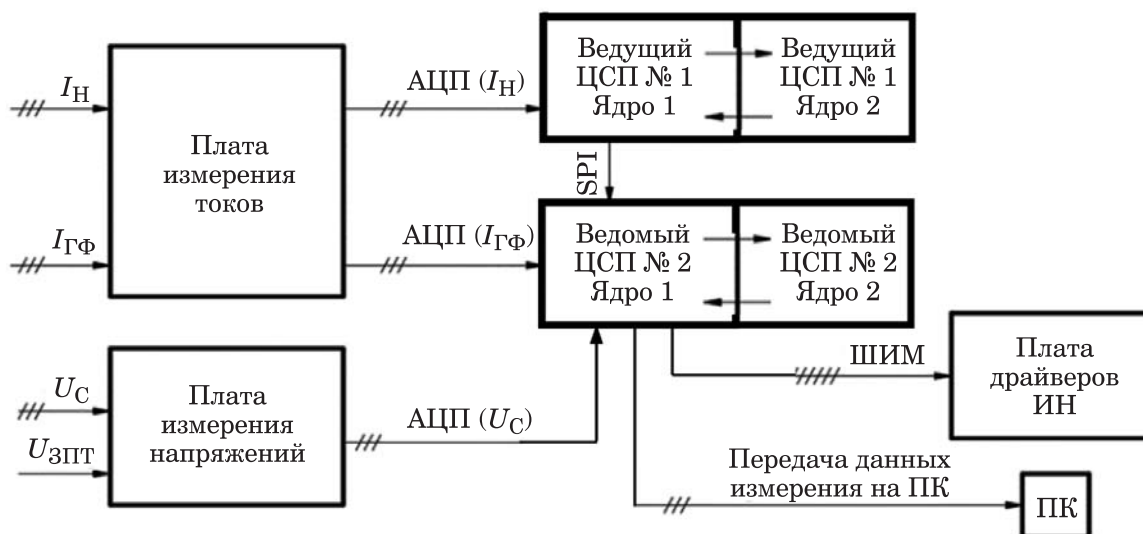


Рис. 3. Распределение функций системы управления прототипа ГФ на базе ЦСП TMS320F28379D

стью двух цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) Texas Instruments TMS320F28379D.

Ввиду значительной вычислительной нагрузки, обусловленной применением в алгоритме нескольких фильтров Калмана, общая структура системы управления распределяется между двумя ЦСП, которые обмениваются данными между собой по SPI-интерфейсу (рис. 3).

Так, ведущий ЦСП № 1 отвечает за определение фазных токов ВГ нелинейной нагрузки с помощью фильтров Калмана. При этом расчет трехфазных токов ведется в двухфазной $\alpha\beta$ СК с помощью двух фильтров Калмана, что позволяет сэкономить вычислительные ресурсы.

Ведомый ЦСП № 2 предназначен для формирования сигнала управления гистерезисно-

Параметры экспериментального стенда регулирования КЭ

Активно-индуктивное сопротивление сети		Дополнительная нелинейная нагрузка 3 кВт		Активная часть ГФ		Пассивная часть ГФ			Компенсированная нелинейная нагрузка 2 кВт		
L_C , мГн	R_C , Ом	C_{DC0} , мкФ	R_{DC0} , Ом	$U_{ЗПТ*}$, В	$C_{ЗПТ}$, мкФ	$C_{ПФ}$, мкФ	$L_{ПФ}$, мГн	$R_{ПФ}$, Ом	C_{DC} , мкФ	L_{AC} , мГн	R_{DC} , Ом
160	4,5	235	90	250	810	50	5	0,1	235	1,5	162

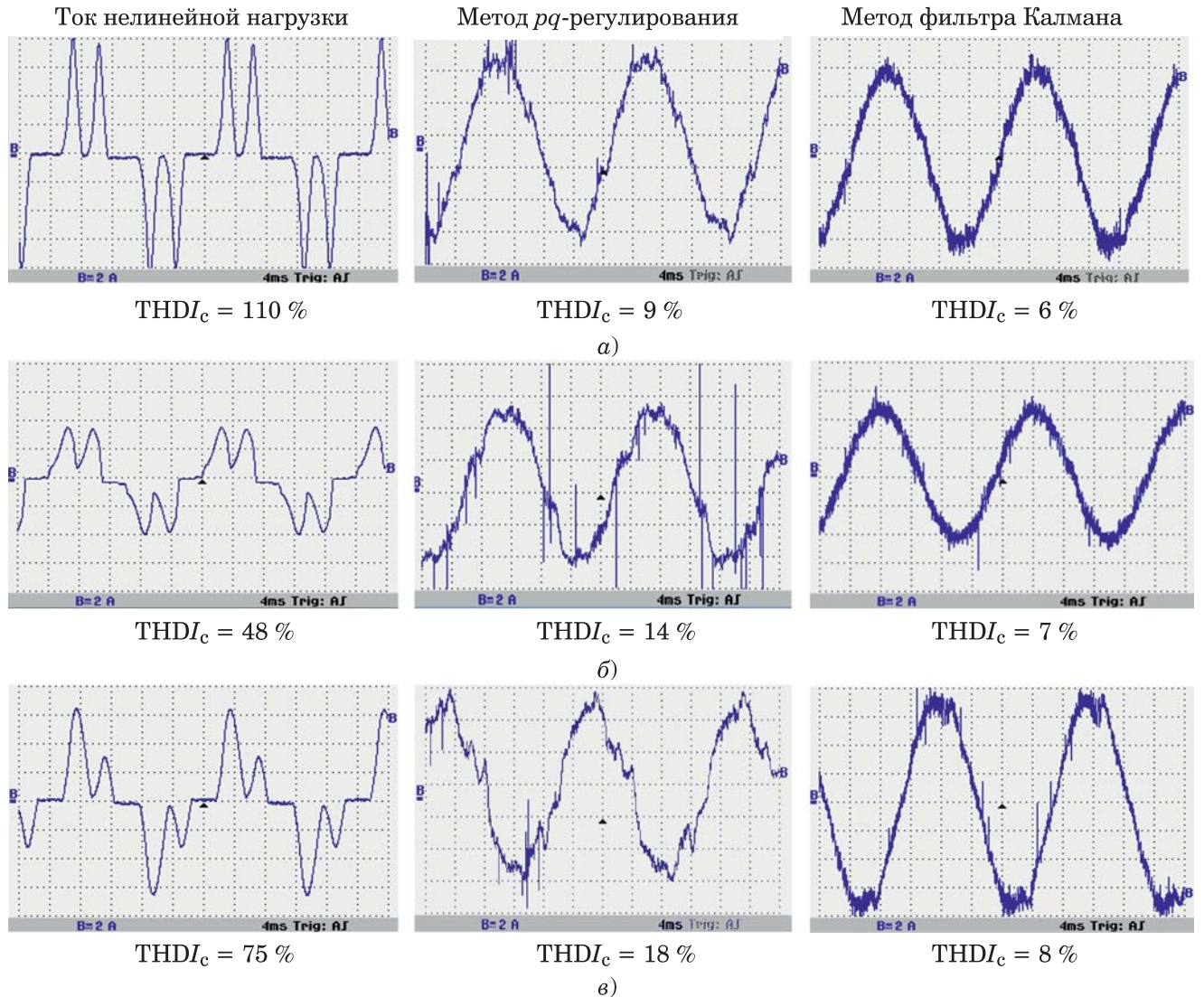


Рис. 4. Экспериментальные осциллограммы ГФ на базе двух алгоритмов управления при синусоидальном симметричном (а), несинусоидальном (б) и несимметричном (в) напряжении сети

го регулятора инвертора напряжения в соответствии с формулой (1): для этого фазные составляющие тока заряда определяются с помощью ПИ-регулятора напряжения ЗПТ и фильтра Калмана сетевого напряжения и за-

тем складываются с составляющими фазных токов ВГ нелинейной нагрузки, переданными от ЦСП № 1. ЦСП № 2 также содержит вспомогательные системы, обеспечивающие функционирование ГФ, включая запуск/остановку

инвертора, защиту от сверхтоков и перенапряжений, передачу данных на ПК.

Для анализа функционирования разработанного прототипа ГФ с алгоритмом управления по методу расширенного фильтра Калмана был собран экспериментальный стенд, позволяющий воспроизводить регулируемые уровни несинусоидальности и несимметрии напряжения питания за счет создания несинусоидальных или несимметричных падений напряжения на сетевом сопротивлении в результате подключения дополнительных нелинейной трехфазной или линейной однофазной нагрузок, а также изменения активно-индуктивного сопротивления сети (табл. 2). Были рассмотрены три случая работы электрической сети:

нормальный уровень КЭ;

повышенный уровень несинусоидальности напряжения $THD_{UC} = 11\%$ (питание через активно-индуктивное сопротивление с подключенной дополнительной нелинейной нагрузкой);

повышенный уровень несимметрии напряжения $k_{2U} = 4\%$ (питание через активное сопротивление с подключенной дополнительной линейной однофазной нагрузкой).

По аналогии с описанным выше опытом теоретического моделирования экспериментальная оценка эффективности разработанного алгоритма проводилась в сравнении с результатами, обеспечиваемыми типовым методом управления ГФ на основе pq -регулирувания. Для этого оценивался уровень искажений сетевого тока в условиях нормального и низкого уровня КЭ при компенсации гармонической эмиссии нелинейной нагрузки при работе прототипа ГФ, в ЦСП которого загружалось программное обеспечение двух рассматриваемых алгоритмов.

Экспериментальные осциллограммы для случаев питания синусоидальным симметричным (рис. 4, а), несинусоидальным (рис. 4, б) и несимметричным напряжением (рис. 4, в) подтверждают полученные ранее теоретические результаты и свидетельствуют о значительном снижении эффективности алгоритма pq -регулирувания, в то время как разработанный алгоритм по методу расширенного фильтра Калмана обеспечивает неизменно высокий уровень компенсации ВГ независимо от искажений напряжения.

Выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность работы ГФ с перспективным алгоритмом управления по методу расширенного фильтра Калмана в условиях низкого уровня КЭ.

2. Помимо отмеченных достоинств указанный алгоритм позволяет дополнительно расширить функционал ГФ за счет более полного использования конденсаторов ЗПТ активной части в целях динамической компенсации реактивной мощности нелинейной нагрузки. Практическому внедрению данной функции в систему управления ГФ будут посвящены дальнейшие исследования.

Список литературы

1. Боярская, Н. П. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: коллективная монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров, С. А. Темербаев, Е. С. Шевченко. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. — 192 с.
2. Asiminoael, L. Detection is key - Harmonic detection methods for active power filter applications / L. Asiminoael, F. Blaabjerg and S. Hansen, // in IEEE Industry Applications Magazine, — Vol. 13, No. 4. — Pp. 22 – 33, July-Aug. 2007, DOI: 10.1109/MIA.2007.4283506.
3. Akagi, H. Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems / H. Akagi // IEEE trans. on power delivery. 1997. — Vol. 12. No. 1. — Pp. 354 – 362.
4. Kim, H. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames / H. Kim, H. Akagi // Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS'99 (Cat. No. 99TH8475), Hong Kong, China, 1999. — Pp. 422 – 427. — Vol. 1, DOI: 10.1109/PEDS.1999.794600.
5. Peng, F. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems / F. Peng, J. Lai // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 45(1): 293 – 297.
6. MuniaSelvan, L. Harmonic Analysis Using Wavelet Transform for Active Power Filter Applications / L. MuniaSelvan and P. Rathika, 2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS), Tamilnadu, India. — 2019. — Pp. 1 – 5, DOI: 10.1109/INCOS45849.2019.8951337.
7. Дюдяков, А. А. Алгоритм управления гибридным фильтром, устойчивый к искажениям напряжения сети / А. А. Дюдяков, С. А. Янченко // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (с элементами научной школы для молодежи). — Москва, 2023. — С. 217 – 227.

References

1. **Boyarskaya N. P., Dovgun V. P., Egorov D. E., Temerbaev S. A., Shevchenko E. S.** *Sintez fil'tro-kompensiruyushchikh ustroystv dlya sistem elektros-nabzheniya: kollektivnaya monografiya* (Synthesis of filter compensating devices for power supply systems: collective monograph), Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2014, 192 p.
2. **Asiminoael L., Blaabjerg F., Hansen S.** Detection is key – Harmonic detection methods for active power filter applications, in *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 13, No. 4, pp. 22 – 33, 2007, DOI: 10.1109/MIA.2007.4283506.
3. **Akagi H.** Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems, *IEEE trans. on power delivery*, 1997, Vol. 12, No. 1, pp. 354 – 362.
4. **Kim H., Akagi H.** The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames, *Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99* (Cat. No. 99TH8475), Hong Kong, China, 1999, pp. 422 – 427, Vol. 1, DOI: 10.1109/PEDS.1999.794600.
5. **Peng F., Lai J.** Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 45(1), pp. 293 – 297.
6. **MuniaSelvan L., Rathika P.** Harmonic Analysis Using Wavelet Transform for Active Power Filter Applications, 2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS), Tamilnadu, India, 2019, pp. 1 – 5, DOI: 10.1109/INCOS45849.2019.8951337.
7. **Dyudyakov A. A., Yanchenko S. A.** *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (s elementami nauchnoi shkoly dlya molodezhi)* (Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation (with elements of a scientific school for youth)), 2023, pp. 217 – 227.

yanchenkosa@mpei.ru

Дата поступления 8.04.2025

Дата принятия к публикации 25.04.2025

A new control technique for hybrid harmonic filters

Diudiakov A. A., Yanchenko S. A.

This paper presents results of theoretical and practical evaluation of the new control technique based on Extended Kalman filters proposed for hybrid harmonic filters. Despite of computational intensity this algorithm guarantees high filtering performance in low power quality conditions, being a valuable alternative to commonly used pq-theory or dq-frame control techniques.

Keywords: hybrid harmonic filter, harmonics, nonlinear load, power quality.

DOI: 10.71759/q468-bd37

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Определение точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля для мультисканального стринг-инвертора с помощью короткого замыкания

Гришин С. Э., аспирант

Анучин А. С., доктор техн. наук, Демидова Г. Л., канд. техн. наук

Горбунов Н. М., магистр, Кулик Е. С., канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Хао Чен, канд. техн. наук

Китайский университет горного дела и технологий, Суйчжоу, Китай

В фотоэлектрических системах широко используются различные методы определения точки максимальной мощности фотоэлектрических модулей, при этом самым распространенным является метод восхождения. Хотя он демонстрирует достаточную эффективность в небольших фотоэлектрических установках, их производительность ухудшается в условиях частичного затенения из-за невозможности точно определить точку максимальной мощности. Предлагается усовершенствованная стратегия определения ТММ, разработанная для стринг-инверторов, подключенных к панелям через несколько повышающих DC–DC-преобразователей. Основное нововведение заключается в реализации контролируемого короткого замыкания через DC–DC-преобразователь для обеспечения неконтролируемой зарядки входного конденсатора, используемого для идентификации ТММ. Этот алгоритм облегчает получение вольт-амперных характеристик массива ФЭМ в реальном времени, тем самым обеспечивая точное вычисление ТММ даже в условиях неравномерной освещенности, вызванной частичным затенением. Анализ переходного процесса зарядки конденсатора обеспечивает быструю сходимость к оптимальной рабочей точке, достигая идентификации ТММ в течение менее 20 мс, не вызывая при этом значительных колебаний выходной мощности инвертора во время измерения. Эта методология эффективно решает проблему многопиковой кривой мощности, присущую частично затененным фотоэлектрическим системам, демонстрируя превосходную производительность по сравнению с традиционными подходами ТММ в сложных сценариях освещения.

Ключевые слова: точка максимальной мощности, фотоэлектрические системы, условия частичного затенения, повышающий DC–DC-преобразователь, вольт-амперные характеристики.

Растущий спрос на возобновляемые источники энергии ускорил развитие фотоэлектрических систем как устойчивого и экологически чистого решения для производства электроэнергии. Однако на эффективность фотоэлектрических систем существенно влияют изменения солнечного излучения, температуры и условий окружающей среды. Чтобы максимизировать извлечение энергии из фотоэлектрических панелей, используются методы отслеживания точки максимальной мощности для непрерывной регулировки рабочей точки и обеспечения оптимальной выходной мощности [1].

Метод отслеживания точки максимальной мощности (ТММ) на основе тока короткого замыкания привлек внимание своей простотой,

точностью и быстрым откликом в динамических условиях окружающей среды. Поскольку фотоэлектрические панели защищены от короткого замыкания [2], то при применении данного метода используется пропорциональная зависимость между током короткого замыкания [3] и током точки максимальной мощности, что позволяет эффективно и адаптивно отслеживать мощность. Для повышения точности отслеживания и уменьшения времени отклика, включая дробный ток короткого замыкания [4], было предложено несколько вариантов: метод определения ТММ на основе импульса короткого замыкания [5] и гибридные подходы, включающие метод восхождения [6].

Проведенные исследования продемонстрировали эффективность методов короткого замыкания для улучшения производительности отслеживания ТММ при минимизации потерь энергии. Передовые методы, такие как отслеживание короткого замыкания в реальном времени, адаптивные импульсы короткого замыкания и интеграция с контроллерами на основе искусственного интеллекта, еще больше повышают эффективность генерации фотоэлектрической энергии. Эти достижения делают метод определения ТММ на основе короткого замыкания особенно подходящим для недорогих реализаций с микроконтроллерными системами управления и приложений в микрогридах, распределенной генерации и интегрированных в здания фотоэлектрических энергосистемах [7, 8].

За последнее десятилетие стринг-инверторы стали традиционным решением для диапазона мощности ниже мегаватта. Они содержат несколько (до 12 или даже больше) входов для цепочек фотоэлектрических панелей. Каждый вход оснащен повышающим преобразователем постоянного тока. Такая конфигурация оборудования допускает более эффективное извлечение солнечной энергии при использовании различных типов фотоэлектрических панелей или в случае частичного затенения панелей из-за погодных условий. Наличие нескольких повышающих преобразователей, параллельно питающих сетевой инвертор, позво-

ляет реализовать метод короткого замыкания, когда для каждой из цепочек фотоэлектрических модулей (ФЭМ) ТММ определяется независимо в различные моменты времени. Это гарантирует непрерывное питание при проведении процедуры определения ТММ.

В данной статье описан алгоритм снятия вольт-амперной характеристики цепи фотоэлектрических модулей путем замыкания накоротко входного повышающего преобразователя с дальнейшим отслеживанием неконтролируемого процесса заряда входного конденсатора. Полученная при этом кривая напряжения позволяет точно определить точку максимальной мощности.

Стринг-инвертор и система управления

Инвертор состоит из входных повышающих DC–DC-преобразователей и сетевого инвертора (рис. 1). Сетевой инвертор обычно выполняется по трехуровневой топологии, что помогает снизить потери при коммутации (из-за вдвое меньшего коммутируемого напряжения) и уменьшить размер фильтра на стороне сети. Управление сетевыми инверторами и методы модуляции были исследованы в [9] и [10].

Входные повышающие преобразователи могут быть реализованы с использованием двухуровневой или трехуровневой топологии. Для простоты в данной статье рассматривает-

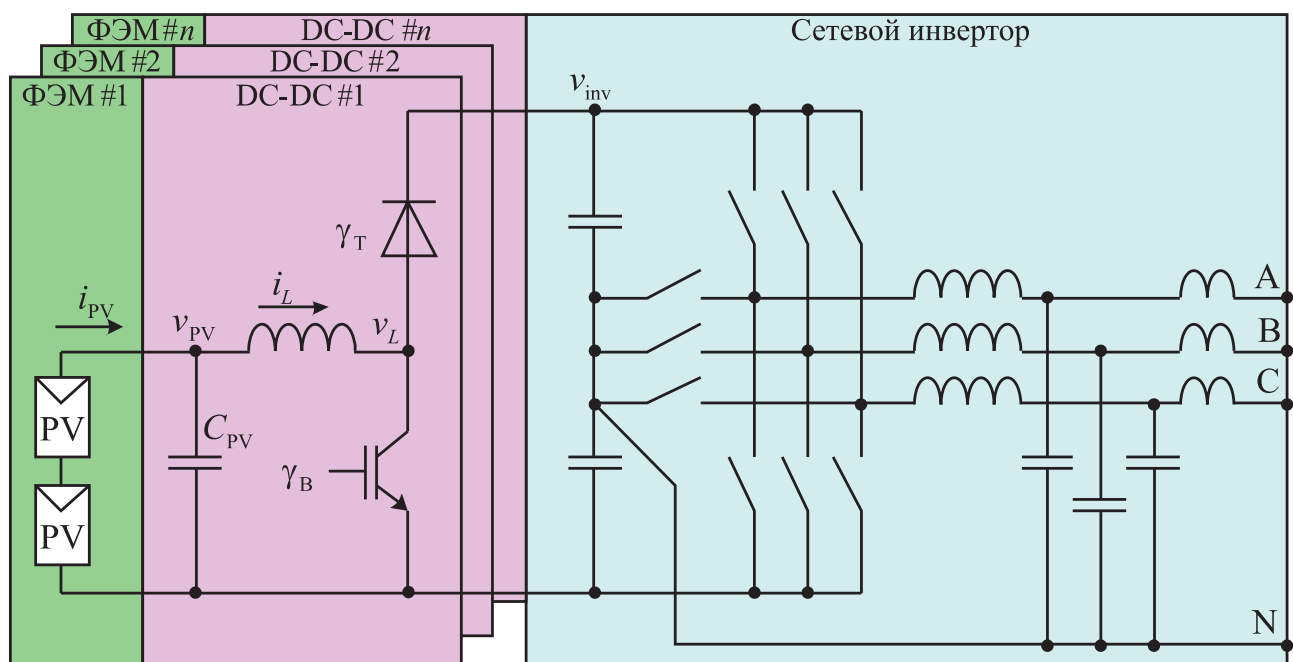


Рис. 1. Стринг-инвертор

ся двухуровневая топология. Наличие нескольких повышающих преобразователей позволяет независимо подключать несколько цепей фотоэлектрических панелей к одному сетевому инвертору. Эти панели могут отличаться, иметь разные номинальные мощности и напряжения, а выходная мощность может быть максимизирована для каждой панели в случае частичного затенения.

Система управления для повышающего преобразователя представляет собой систему подчиненного регулирования [11] с внутренним контуром тока и внешним контуром напряжения. Предполагается, что в номинальном режиме работы фотоэлектрические панели генерируют меньше мощности, чем сетевой инвертор может поставлять в электросеть. Таким образом, в большинстве случаев повышающий преобразователь работает с током дросселя, диктуемым ТММ.

Среднее напряжение на входе несимметричного полумоста рассчитывается по формуле

$$U_L = (1 - \gamma_B) U_{DC}, \quad (1)$$

где γ_B — коэффициент заполнения нижнего ключа; U_{DC} — напряжение звена постоянного тока сетевого инвертора.

Ток, протекающий через индуктивность, можно записать как интеграл разности приложенного напряжения:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_{ФЭМ} - U_L}{L}, \quad (2)$$

где i_L — ток, протекающий через индуктивность; $U_{ФЭМ}$ — напряжение ФЭМ; L — входная индуктивность повышающего преобразователя.

Структурная схема математической модели повышающего преобразователя показана в правой части рис. 2. Она состоит из инерционного звена первого порядка с постоянной времени, равной одному периоду ШИМ, и коэффициента усиления, равного напряжению звена постоянного тока сетевого инвертора согласно (1). Входной сигнал инерционного звена первого порядка — это скважность верхнего ключа γ_T , который фактически отсутствует в системе, но его можно выразить из скважности нижнего ключа:

$$\gamma_T = 1 - \gamma_B. \quad (3)$$

Это более удобно для построения регулятора тока, так как теперь увеличение задания ре-

гулятора тока приводит к увеличению тока дросселя. Далее дроссель представлен интегратором.

Ток дросселя разряжает входной конденсатор DC-DC-преобразователя C_{PV} и заряжает выходной конденсатор инвертора C_{inv} .

Производная напряжения конденсатора определяется следующим уравнением:

$$\frac{dU_{DC}}{dt} = \frac{i_L(1 - \gamma_B) - i_{DC}}{C_{DC}}, \quad (4)$$

где i_{DC} — ток, потребляемый от звена постоянного тока инвертора.

Контур тока содержит пропорционально-интегральный регулятор, выходом которого является задание напряжения для DC-DC-преобразователя. Чтобы далее получить задание коэффициента заполнения γ_T , необходимо поделить задание напряжения для DC-DC-преобразователя на значение напряжения звена постоянного тока. Равновесие системы наступает, когда среднее напряжение на входе несимметричного полумоста U_L равно напряжению фотоэлектрического модуля. Таким образом, целесообразно переносить сигнал напряжения ФЭМ $U_{ФЭМ}$ на сторону управления через инерционное звено и добавлять его через сумматор к выходу регулятора тока. В этом случае нулевой выход регулятора тока приведет к нулевой производной тока дросселя.

Контур напряжения организован с помощью двух регуляторов напряжения. Один регулятор отвечает за определение ТММ (пропорционально-интегральный регулятор). Другой регулятор пропорционального типа регулирует напряжение ЗПТ инвертора. Минимальное значение их выходов применяется в качестве задания тока дросселя. Такая стратегия управления построена из следующих соображений. Обычно номинальная мощность сетевого инвертора больше мощности, передаваемой от ФЭМ, поэтому он способен генерировать всю доступную мощность в сеть. Если выходная мощность сетевого инвертора больше мощности, доступной от ФЭМ, то регулятор мощности сетевого инвертора стабилизирует напряжение звена постоянного тока на минимальном уровне, который меньше задания напряжения (рис. 2). В этом случае выход регулятора напряжения ЗПТ инвертора будет максимальным из двух регуляторов, и система должна будет работать в точке максимальной мощности, используя задание напряжения от

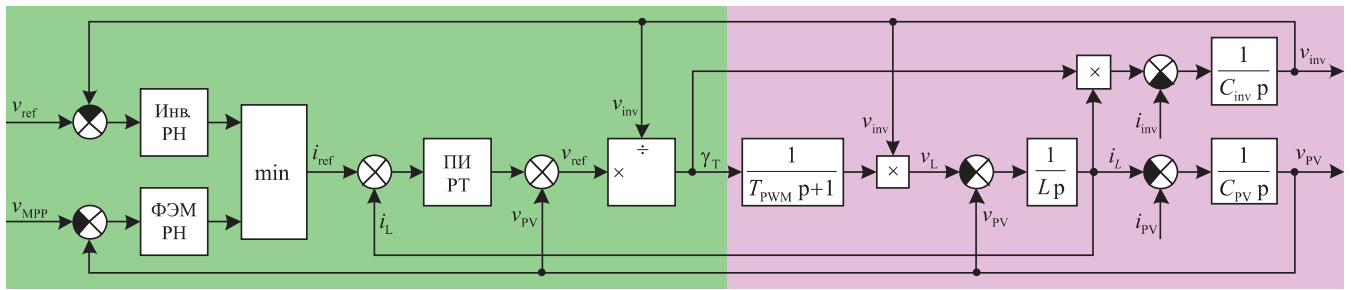


Рис. 2. Структурная схема повышающего преобразователя и его система управления:

ПИ РТ — пропорционально-интегральный регулятор тока; Индв. РН — регулятор напряжения ЗПТ инвертора; ФЭМ РН — регулятор напряжения ФЭМ

регулятора напряжения ФЭМ. Это задание напряжения обеспечит работу цепочки ФЭМ в точке максимальной мощности.

Другой случай — когда мощность ФЭМ чрезмерно высока. Например, это может произойти, когда сетевой инвертор работает в островном режиме, а нагрузка мала. Тогда напряжение ЗПТ инвертора будет увеличиваться, достигая уровня задания. Дальнейшее увеличение напряжения звена постоянного тока невозможно, так как оно ограничено максимально допустимым уровнем. В этом случае регулятор напряжения инвертора начнет уменьшать свой выход. Когда он станет меньше выхода регулятора напряжения ФЭМ, задание на ток дросселя в соответствии с функцией «min» переключится на выходное значение регулятора напряжения инвертора. Цепочка ФЭМ больше не находится в ТММ, и ее выходное напряжение увеличится.

Оценка вольт-амперной характеристики

Ток короткого замыкания фотоэлектрических модулей очень близок к его номинальному значению (рис. 3). Это позволяет безопасно выполнять короткое замыкание фотоэлектрических модулей с помощью того же повышающего преобразователя, используемого для нормальной работы. Короткое замыкание цепи и последующий сброс на холостой ход дает возможность зафиксировать всю вольт-амперную характеристику цепи фотоэлектрических модулей, находя ТММ даже для частично затененных фотоэлектрических панелей.

Ожидается, что система изначально будет работать вблизи ТММ. Однако параметры инсоляции и частичного затенения меняются с течением времени. Поэтому необходимо периодически снимать вольт-амперную характе-

ристику цепи фотоэлектрических модулей. Это выполняется в следующей последовательности:

- 1) нормальная работа с заданием напряжения, соответствующим напряжению ТММ;
- 2) увеличение тока дросселя выше тока короткого замыкания их фотоэлектрических модулей до тех пор, пока напряжение не достигнет нуля;
- 3) выключение повышающего преобразователя и отслеживание производной напряжения фотоэлектрических модулей и напряжения фотоэлектрических модулей во времени при поиске глобальной ТММ;
- 4) обновление напряжения ТММ и включение системы управления с новым заданием напряжения на регуляторе напряжения ФЭМ.

При нормальной работе система управления имеет внешний контур напряжения, который стабилизирует напряжение соответственно точке максимальной мощности цепи фотоэлектрических модулей. Этот режим работы аналогичен первому этапу предложенной последовательности. Если напряжение звена постоянного тока инвертора превышает максимальный уровень, то отдельный регулятор на-

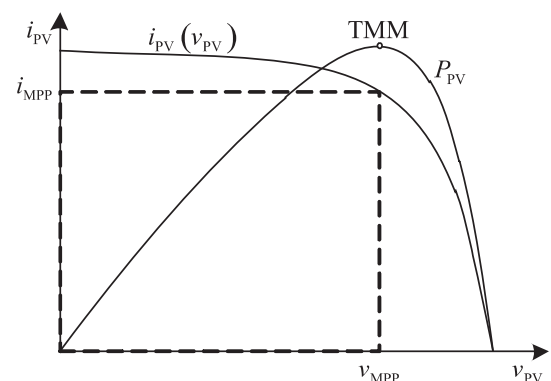


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика ФЭМ

пряжения инвертора пропорционального типа может «перехватить» управление током дросселя у регулятора напряжения ФЭМ, чтобы ограничить ток питания инвертора. В этом случае нет необходимости находить глобальную ТММ, так как мощности достаточно для поддержки сети.

Короткое замыкание ФЭМ достигается за счет увеличения выхода регулятора напряжения (которое является заданием тока дросселя) выше уровня тока короткого замыкания фотоэлектрической панели. Этот режим работы соответствует второму этапу последовательности.

После достижения нулевого напряжения на выходе ФЭМ система отключает управление повышающим преобразователем до тех пор, пока напряжение конденсатора $C_{ФЭМ}$ не достигнет установившегося значения. Это третий этап последовательности. Система управления отслеживает напряжение конденсатора $C_{ФЭМ}$ в процессе заряда. Ток ФЭМ рассчитывают по формуле

$$i_{ФЭМ} = C_{ФЭМ} \frac{dU_{ФЭМ}}{dt}.$$

Следует отметить, что точность оценки тока зависит от того, насколько точно известна емкость $C_{ФЭМ}$.

Мощность фотоэлектрической цепи находят из выражения

$$P_{ФЭМ} = U_{ФЭМ} i_{ФЭМ} = C_{ФЭМ} U_{ФЭМ} \frac{dU_{ФЭМ}}{dt}.$$

Точность снятия кривой мощности ФЭМ относительно напряжения пропорциональна точности значения ёмкости конденсатора $C_{ФЭМ}$, которое может иметь серьёзную погрешность. Эта емкость влияет на точную оценку уровня мощности, но не влияет на ее экстремум относительно напряжения. Следовательно, можно определить ТММ при любом напряжении, независимо от ошибки в значении емкости $C_{ФЭМ}$. Поэтому целесообразно определять ТММ, ориентируясь на напряжение фотоэлектрического модуля, а не на ток.

После достижения установившегося напряжения на выходе ФЭМ система управления должна обновить задание напряжения на регуляторе напряжения ФЭМ. Это является четвертым шагом в описанной ранее последовательности действий. После этого цикл повторяется.

Результаты симуляции

Имитационная модель была построена в MATLAB Simulink с использованием библиотеки SimPowerSystem. Параметры имитационной модели:

параметры ФЭМ:

модель ФЭМ Dongfang Electric (Yixing)
MAGI MGSM-315-72
конфигурация подключения
модулей. 40 параллельно
10 последовательно
максимальная мощность модуля 315 Вт
напряжение холостого хода 45,67 В
ток короткого замыкания 8,75 А

повышающий преобразователь:

емкость конденсатора на стороне ФЭМ . 2000 мкФ
общая емкость звена постоянного тока . . 10 000 мкФ
индуктивность дросселя 20 мкГн
частота ШИМ 15 кГц
пропорциональный коэффициент
регулятора тока 1 В/А
интегральный коэффициент
регулятора тока 0,2 В/(А·с)
пропорциональный коэффициент
регулятора напряжения ФЭМ 10 А/В
интегральный коэффициент
регулятора напряжения ФЭМ 10 000 А/(В·с)
пропорциональный коэффициент
регулятора напряжения инвертора. 10 А/В
ограничение задания тока 400

Нормальная работа при ТММ с ограничением напряжения инвертора

Для первого эксперимента инсоляция фотоэлектрических модулей была установлена на уровне 900 Вт/м². Имитация нагрузки инвертора реализована с помощью резистора 10 Ом, что эквивалентно 56 кВт нагрузки при 750 В напряжения ЗПТ инвертора. Задание регулятора напряжения инвертора установлено 750 В, а ТММ — на уровне 382,5 В. Экспериментальные результаты представлены на рис. 4.

Перед началом переходного процесса задание тока дросселя 400 А. Регулятор напряжения ФЭМ и регулятор напряжения инвертора находились в режиме насыщения, обеспечивая максимальное значение тока дросселя. Ток дросселя достиг уровня задания с небольшим перерегулированием. Напряжение ФЭМ начало уменьшаться от напряжения холостого хода и достигло ТММ примерно за 1 мс. В то же время регулятор напряжения ФЭМ вышел из насыщения и продолжил поддерживать задание тока дросселя в ТММ. После достижения ТММ ток дросселя стабилизировался, как и ток ФЭМ, воспроизводящий ток дросселя

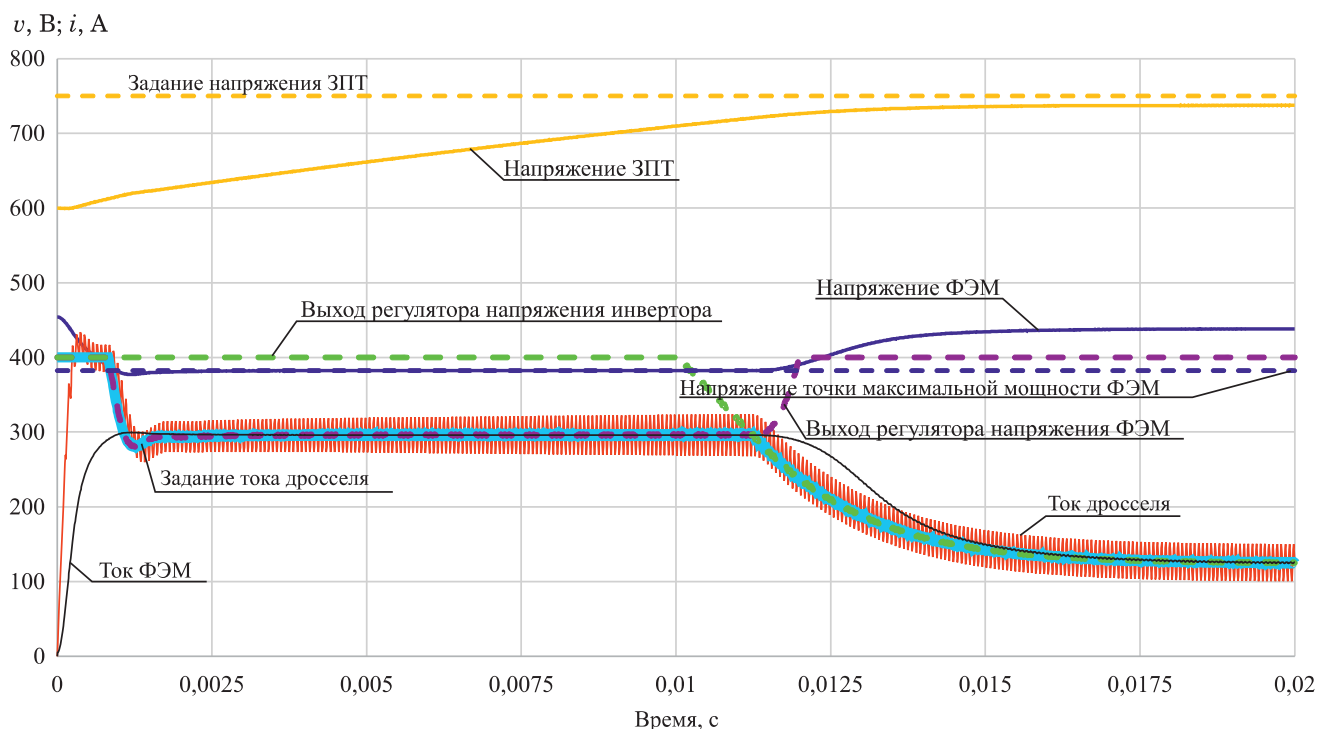


Рис. 4. Запуск в МПП с дальнейшей стабилизацией напряжения инвертора

с некоторой задержкой, вызванной наличием входного конденсатора со стороны ФЭМ.

В это время повышающий преобразователь заряжал ЗПТ инвертора, и его выходная мощность была больше генерируемой в нагрузку. По мере роста напряжения ЗПТ инвертора ошибка между значением задания и фактическим значением напряжения становилась меньше. В момент времени 10 мс выход регулятора напряжения инвертора начал уменьшаться. В момент 11 мс выход регулятора напряжения инвертора стал меньше выхода регулятора напряжения ФЭМ, и с этого момента он использовался для формирования значения задания тока дросселя. Меньшее задание тока дросселя помогло стабилизировать напряжение ЗПТ сетевого инвертора на допустимом уровне.

Поиск ТММ при хороших погодных условиях

Следующий эксперимент был проведен для алгоритма поиска ТММ. Эквивалентная нагрузка сетевого инвертора была увеличена в 2 раза, чтобы не достичь ограничения напряжения инвертора. Результаты моделирования представлены на рис. 5. Первая часть осциллограммы показывает нормальную работу с некоторым заданием напряжения ФЭМ. В момент времени 5 мс началась процедура снятия

вольт-амперной характеристики. Регулятор тока получил максимальный ток дросселя в качестве задания для выполнения короткого замыкания ФЭМ. Напряжение ФЭМ начало уменьшаться и достигло нуля в 13,9 мс. После этого повышающий преобразователь отключился, и система управления отслеживала увеличение напряжения ФЭМ по мере зарядки входного конденсатора. В это время система управления вычисляла точку максимальной мощности, используя (6). Нет необходимости использовать в расчетах емкость входного конденсатора, так как требуется найти только максимум функции независимо от ее масштаба, поэтому емкость была исключена из (6). Кривая $U_{\text{ФЭМ}} \frac{dU_{\text{ФЭМ}}}{dt}$ (показана фиолетовым цветом на рис. 5) с 13,9 до 18,1 мс. Максимум функции был пройден на 16,45 мс, а напряжение ТММ составило 382,5 В. После достижения устойчивого состояния система управления напряжением ФЭМ снова запустилась с обновленным заданием напряжения ТММ на 18,1 мс.

Поиск ТММ при частичном затенении

Третий эксперимент проводился с частично затененными ФЭ-панелями. Для половины панелей инсоляция составляла 900 Вт/м^2 , для

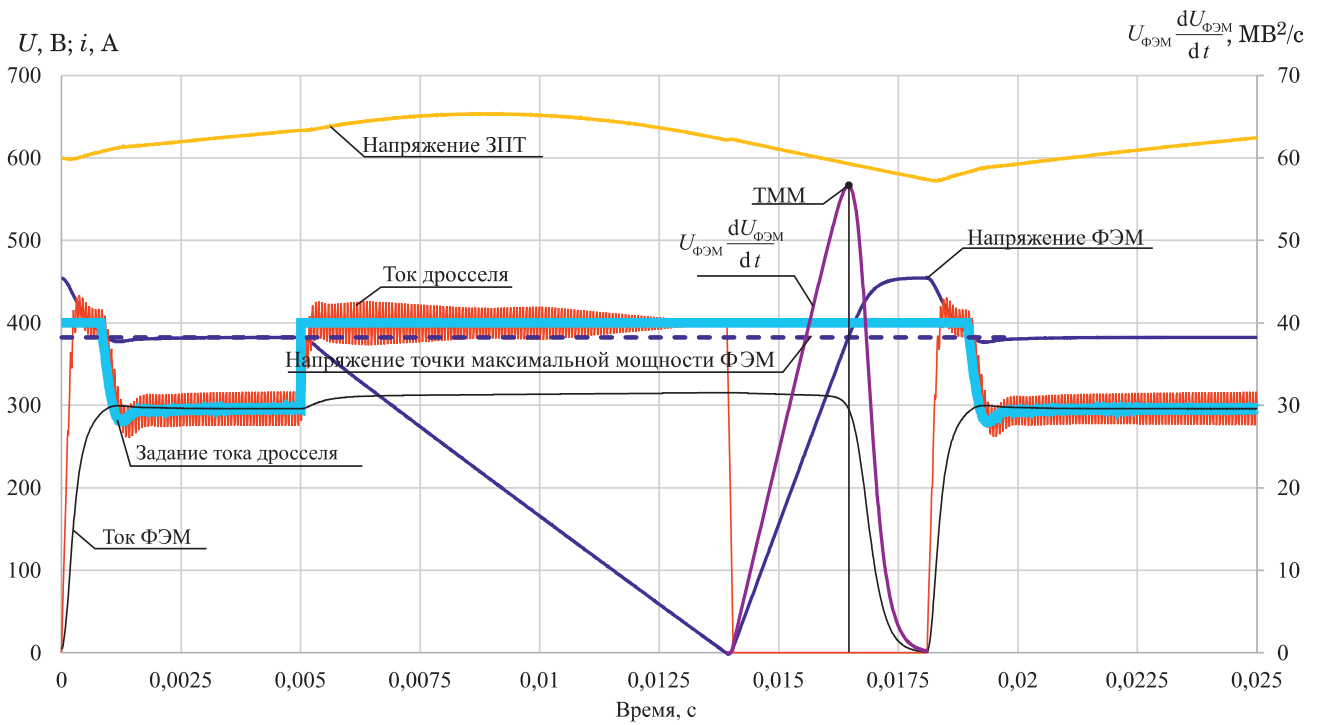


Рис. 5. Поиск ТММ при хороших погодных условиях

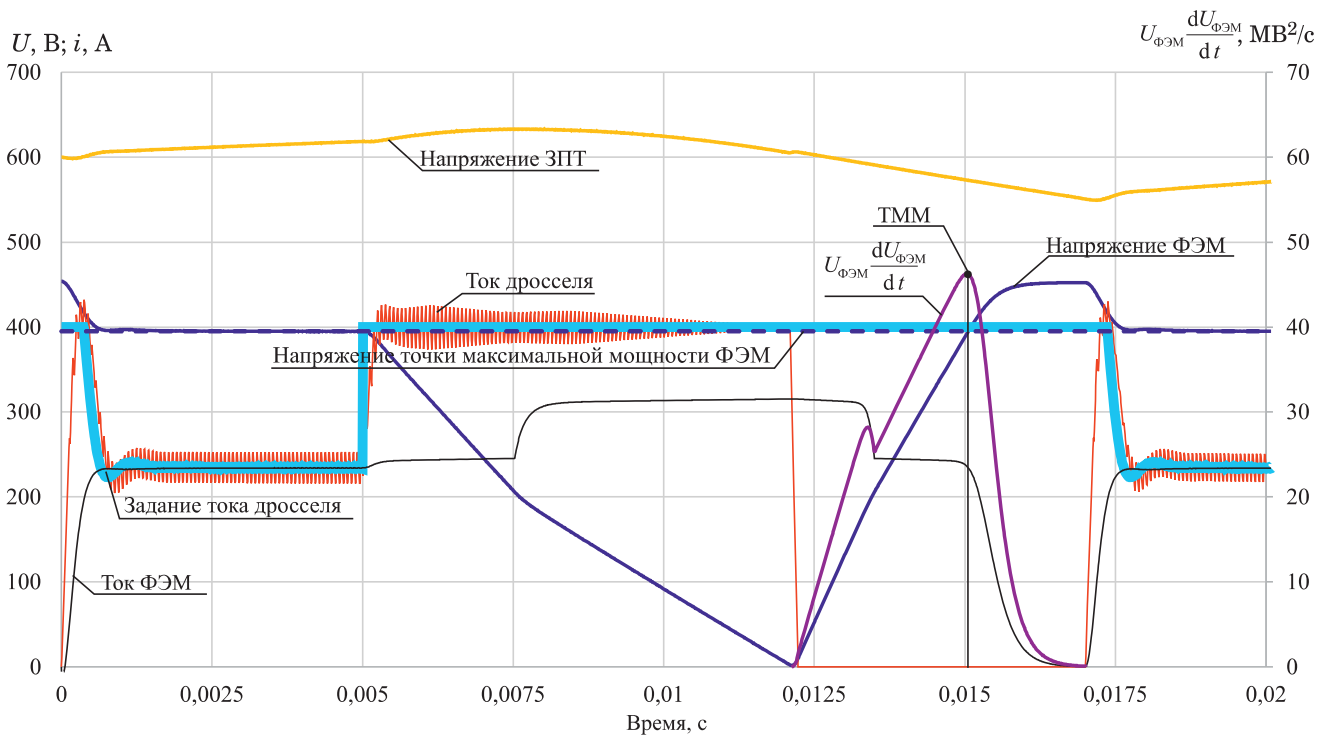


Рис. 6. Поиск ТММ при частичном затенении

другой половины панелей — только 700 Вт/м^2 . Напряжение ТММ в этом случае 395 В . Запуск системы проводится так же, как и в предыдущем эксперименте. Разница видна при восстановлении напряжения ФЭМ после короткого

замыкания. После выключения повышающего преобразователя на $12,1 \text{ мс}$ процесс зарядки входного конденсатора позволяет получить ТММ. Мгновенная вольт-амперная характеристика теперь имеет один локальный экстремум

и один глобальный максимум, показанные фиолетовой кривой на рис. 6 от 12,1 до 17,0 мс. По окончании процесса снятия вольт-амперной характеристики началась нормальная работа повышающего преобразователя в МПП.

Выводы

1. Стринг-инверторы имеют несколько входных повышающих преобразователей, которые дают возможность проводить индивидуальные измерения вольт-амперных характеристик, подключенных ФЭМ с помощью короткого замыкания без прерывания потока мощности в сеть. Предложена система подчиненного управления с контурами тока и напряжения, а также алгоритм снятия вольт-амперных характеристик. Такая реализация легко получает точную точку максимальной мощности фотоэлектрической цепочки даже в случае частичного затенения фотоэлектрических панелей.

2. Изменение выходной мощности с течением времени указывает на то, что условия затенения также меняются, что может быть использовано для запуска процедуры снятия вольт-амперной характеристики.

Список литературы

1. **Dadkhah, J. Optimization Methods of TMMT Parameters for PV Systems: Review, Classification, and Comparison** / J. Dadkhah and M. Niroomand // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. — March 2021. — Vol. 9, No. 2. — Pp. 225 – 236, March 2021, DOI: 10.35833/MPCE.2019.000379.
2. **Vagapov, Y. Low-cost photovoltaic emulator for instructional laboratories** / Y. Vagapov and A. Anuchin // 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Coimbra, Portugal. — 2016. — Pp. 1 – 4, DOI: 10.1109/UPEC.2016.8114129.
3. **Noguchi, T. Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system** / T. Noguchi, S. Togashi and R. Nakamoto // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — Feb. 2002. — Vol. 49, No. 1. — Pp. 217 – 223, Feb. 2002, DOI: 10.1109/41.982265.
4. **Nzoundja Fapi, C. B. Real-Time Experimental Assessment of a New TMMT Algorithm Based on the Direct Detection of the Short-Circuit Current for a PV System** / C. B. Nzoundja Fapi, P. Wira, M. Kamta // *RE&PQJ*. — Vol. 19 No. 5 (2021). — Pp. 598 – 603, DOI: 10.24084/repqj19.358.
5. **Noguchi, T. Short-current pulse based adaptive maximum-power-point tracking for photovoltaic power generation system** / T. Noguchi,

S. Togashi and R. Nakamoto, ISIE'2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.00TH8543), Cholula, Puebla, Mexico. — 2000. — Vol. 1. — Pp. 157 – 162, DOI: 10.1109/ISIE.2000.930504.

6. **Sher, H. A. A New Sensorless Hybrid TMMT Algorithm Based on Fractional Short-Circuit Current Measurement and P&O TMMT** / H. A. Sher, A. F. Murtaza, A. Noman, K. E. Addowesh, K. Al-Haddad and M. Chiaberge // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. — Oct. 2015. — Vol. 6, No. 4. — Pp. 1426 – 1434, DOI: 10.1109/TSTE.2015.2438781.
7. **Zhao, T. Active Power Backflow Suppression Strategy of Cascaded PV Solid-State Transformer Under Interphase Short-Circuit Fault Condition** / T. Zhao, Z. Feng, M. Wang, M. Wu and X. Zhang // in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. — April 2023. — Vol. 11, No. 2. — Pp. 2350 – 2363, DOI: 10.1109/JESTPE.2023.3234304.
8. **Yadav, N. Short-Circuit Fault Detection and Isolation Using Filter Capacitor Current Signature in Low-Voltage DC Microgrid Applications** / N. Yadav and N. R. Tummuru, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — Aug. 2022. — Vol. 69, No. 8. — Pp. 8491 – 8500, DOI: 10.1109/TIE.2021.3109523.
9. **Kim, Y. Design and control of a grid-connected three-phase 3-level NPC inverter for Building Integrated Photovoltaic systems** / Y. Kim, H. Cha, B. -M. Song and K. Y. Lee // 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington, DC, USA. — 2012. — Pp. 1 – 7, DOI: 10.1109/ISGT.2012.6175663.
10. **Anuchin, A. A PWM Strategy for the Minimization of Losses in a 3-level T-type Voltage Source Inverter** / A. Anuchin, D. Shpak, M. Gulyaeva, D. Aliamkin, A. Zharkov and Y. Vagapov // 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi, Italy. — 2018. — Pp. 703 – 708, DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445367.
11. **Anuchin, A. Nested Loop Control of a Buck Converter under Variable Input Voltage and Load Conditions** / A. Anuchin, D. Shpak, M. R. Ahmed, E. Stolyarov, D. Surnin and J. P. Acedo // 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Turin, Italy. — 2020. — Pp. 1 – 5, DOI: 10.1109/UPEC49904.2020.9209865.

References

1. **Dadkhah J., Niroomand M.** Optimization Methods of TMMT Parameters for PV Systems: Review, Classification, and Comparison, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, March 2021, Vol. 9, No. 2, pp. 225 – 236, March 2021, DOI: 10.35833/MPCE.2019.000379.
2. **Vagapov Y. and Anuchin A.** Low-cost photovoltaic emulator for instructional laboratories, 2016 51st International Universities Power Engineering Con-

- ference (UPEC), Coimbra, Portugal, 2016, pp. 1 – 4, DOI: 10.1109/UPEC.2016.8114129.
3. **Noguchi T., Togashi S., Nakamoto R. T.** Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Feb. 2002, Vol. 49, No. 1, pp. 217 – 223, Feb. 2002, DOI: 10.1109/41.982265.
 4. **Nzoundja Fapi C. B., Wira P., Kamta M.** Real-Time Experimental Assessment of a New TMMT Algorithm Based on the Direct Detection of the Short-Circuit Current for a PV System, *RE&PQJ*, Vol. 19, No. 5, 2021, pp. 598 – 603, DOI: 10.24084/repqj19.358.
 5. **Noguchi T., Togashi S., Nakamoto R.** Short-current pulse based adaptive maximum-power-point tracking for photovoltaic power generation system, *ISIE'2000, Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.00TH8543)*, Cholula, Puebla, Mexico, 2000, Vol. 1, pp. 157 – 162, DOI: 10.1109/ISIE.2000.930504.
 6. **Sher H. A., Murtaza A. F., Noman A., Addowesh K. E., Al-Haddad K., Chiaberge M.** A New Sensorless Hybrid TMMT Algorithm Based on Fractional Short-Circuit Current Measurement and P&O TMMT, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Oct. 2015, Vol. 6, No. 4, pp. 1426 – 1434, DOI: 10.1109/TSTE.2015.2438781.
 7. **Zhao T., Feng Z., Wang M., Wu M., Zhang X.** Active Power Backflow Suppression Strategy of Cascaded PV Solid-State Transformer Under Interphase Short-Circuit Fault Condition, in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, April 2023, Vol. 11, No. 2, pp. 2350 – 2363, DOI: 10.1109/JESTPE.2023.3234304.
 8. **Yadav N., Tummuru N. R.** Short-Circuit Fault Detection and Isolation Using Filter Capacitor Current Signature in Low-Voltage DC Microgrid Applications, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Aug. 2022, Vol. 69, No. 8, pp. 8491 – 8500, DOI: 10.1109/TIE.2021.3109523.
 9. **Kim Y., Cha H., Song B. -M., Lee K. Y.** Design and control of a grid-connected three-phase 3-level NPC inverter for Building Integrated Photovoltaic systems, 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington, DC, USA, 2012, pp. 1 – 7, DOI: 10.1109/ISGT.2012.6175663.
 10. **Anuchin A., Shpak D., Gulyaeva M., Aliamkin D., Zharkov A., Vagapov Y.** A PWM Strategy for the Minimisation of Losses in a 3-level T-type Voltage Source Inverter, 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi, Italy, 2018, pp. 703 – 708, DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445367.
 11. **Anuchin A., Shpak D., Ahmed M. R., Stolyarov E., Surnin D., Acedo J. P.** Nested Loop Control of a Buck Converter under Variable Input Voltage and Load Conditions, 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Turin, Italy, 2020, pp. 1 – 5, DOI: 10.1109/UPEC49904.2020.9209865.

GrishinSE@mpei.ru

Дата получения 05.03.2025

Дата принятия к публикации 25.04.2025

Determination of maximum power point of photovoltaic module for multi-channel string inverter using short circuit

Grishin S. E., Anuchin A. S., Demidova G. L., Gorbunov N. M., Kulik E. S., Hao Chen

The maximum power point tracking methodologies are widely used in photovoltaic (PV) systems, with perturb and observe algorithms representing the conventional approach. While perturb and observe techniques demonstrate sufficient efficacy in small-scale PV installations, their performance degrades under partial shading conditions due to an inability to accurately identify the global maximum power point (MPP). This paper proposes an advanced MPP strategy designed for string PV inverters incorporating multiple input-side boost DC–DC converters. The core innovation involves implementing a controlled short-circuiting operation through the DC–DC converter, followed by deactivation of the converter to enable uncontrolled charging of the input capacitor used for MPP identification. This sequence facilitates real-time acquisition of the PV array's instantaneous current-voltage characteristics, thereby enabling precise computation of the global MPP even under non-uniform irradiance conditions caused by partial shading. The transient analysis of capacitor charging dynamics permits rapid convergence to the optimal operating point, achieving MPP identification within a sub-20 millisecond timeframe while maintaining minimal disruption to power output during the measurement phase. This methodology effectively addresses the multi-peak power curve challenge inherent in partially shaded PV systems, demonstrating superior performance compared to conventional MPP approaches in complex illumination scenarios.

Keywords: maximum power point (MPP), photovoltaic systems, partial shading conditions, boost DC–DC converter, current-voltage characteristics.

DOI: 10.71759/sjj1-qj24

Специальность 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Моделирование теплообмена в барабанном реакторе с косвенным обогревом

Попов С. К., доктор техн. наук, Валинеева А. А., канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Свистанов И. Н., канд. техн. наук
ФБУ «Ростест – Москва», Москва

Теплоперенос является важным фактором, лимитирующим производительность вращающихся барабанных реакторов с прямым и косвенным обогревом пересыпающегося слоя материала. На основе анализа концептуальных моделей теплопереноса при различных температурах обработки материала выбрана модель, соответствующая процессу торрефикации биомассы в реакторе с косвенным обогревом. Для выбранной модели представлены уравнения для определения коэффициента теплопередачи от греющего теплоносителя к материалу. Предложен способ учета радиационного теплообмена между стенкой барабана и движущимся слоем материала, подвергающегося торрефикации. Установлено, что в диапазоне температур торрефикации (до 700 К) учет радиационного теплообмена приводит к увеличению коэффициента теплопередачи от стенки барабана к материалу не более, чем на 1 %. С повышением температуры технологического процесса до 1300 К учет радиационного теплообмена сопровождается приростом коэффициента теплопередачи не более, чем на 3,3 – 4,5 %. Предложенная инженерная методика определения коэффициентов теплопередачи рекомендуется для конструктивных расчетов реакторов торрефикации.

Ключевые слова: барабанный реактор, косвенный обогрев, торрефикация, математическое моделирование, тепломассоперенос, радиационный теплообмен.

Вращающиеся барабанные печи (реакторы) с пересыпающимся слоем материала широко применяются в цементной промышленности [1], в цветной [2] и черной металлургии, в производстве минеральных удобрений в диапазоне температур процесса от 300 °С до 2000 °С [3].

При моделировании и разработке барабанных реакторов можно выделить четыре определяющих фактора [4]: теплоперенос; движение материала в реакторе; массообмен между материалом и газовым потоком; кинетика химических реакций. Теплоперенос является наиболее важным из этих факторов, так как во многих практических случаях именно он лимитирует производительность барабанного реактора.

Комплекс задач математического моделирования барабанных печей рассмотрен в [3, 5 – 8]. В работе [3] представлены математические модели тепловой работы печей, рассмотрены вопросы сопряженного теплообмена открытых поверхностей слоя шихты и футеровки с печным пространством, теплопередачи от стенки к плотному слою зернистой шихты. Для барабанных печей детально разрабо-

таны вопросы внешнего радиационно-конвективного теплообмена [5 – 7], моделирования процесса горения [8], нестационарного теплопереноса в ограждении печи [9].

В инженерной практике для теплового расчета барабанных печей более 50 лет широко используется методика Е. И. Ходорова [1]. Результаты исследований последних лет дают основу для их обобщения с целью формирования инженерной модели теплообмена в барабанном реакторе с косвенным обогревом, что актуально для теплотехнологических процессов в области умеренных температур. К числу таких процессов относится торрефикация.

Торрефикация — это процесс низкотемпературного пиролиза при температуре 200 – 300 °С, используемый для обработки биомассы с целью улучшения ее теплотехнических характеристик. Основные продукты торрефикации находятся в твердой фазе (торрефикат, 80 %) и в газообразной фазе (торгаз, 20 %) [10]. Торрефикат обладает повышенной теплотой сгорания и насыпной плотностью, гидрофобностью, хорошей измельчаемостью по сравнению с исходной биомассой.

Торрефикация — относительно новая технология и только начинает выходить на промышленный масштаб. В тепловом расчете реакторов торрефикации большое значение имеет адекватное определение значения коэффициента теплопередачи от греющего теплоносителя к материалу, что и определяет цель работы.

Методы исследования

Выполнены анализ теплопереноса и движения материала в барабанной печи для условий процесса торрефикации, а также разработка концептуальной модели процесса.

По сравнению с другими слоевыми реакторами, такими как реакторы с плотным слоем или с кипящим слоем, в барабанной печи (реакторе с пересышающимся слоем) можно отметить специфические особенности теплопереноса [4]:

1) коэффициенты теплоотдачи между газом и движущейся стенкой барабана, а также между газом и поверхностью пересышающегося слоя материала зависят от частоты вращения барабана ω , с^{-1} ;

2) внутренняя поверхность стенки (ограждения) периодически контактирует с газом, затем — со слоем материала, так что теплота от газа, поглощаемая стенкой, косвенно доставляется материалу. Этот процесс теплопереноса, существенный для высокотемпературных газов и описываемый как «механизм поглощения – выделения», зависит от механизма теплопереноса между внутренней поверхностью стенки и слоем материала. Таким образом, важно определить коэффициент теплоотдачи на границе «внутренняя поверхность стенки – материал»;

3) радиационный теплообмен не может быть проигнорирован при относительно высокой температуре газа либо стенки барабана.

Эти специфические особенности необходимо учитывать при моделировании теплопереноса в барабанном реакторе торрефикации.

Различаются барабанные реакторы с прямым (внутренним) и с косвенным (внешним) обогревом.

Концептуальные модели теплопереноса в барабанном реакторе

Для обеспечения повышенных температур процесса применяется прямой нагрев: тепловыделение осуществляется в объеме барабана

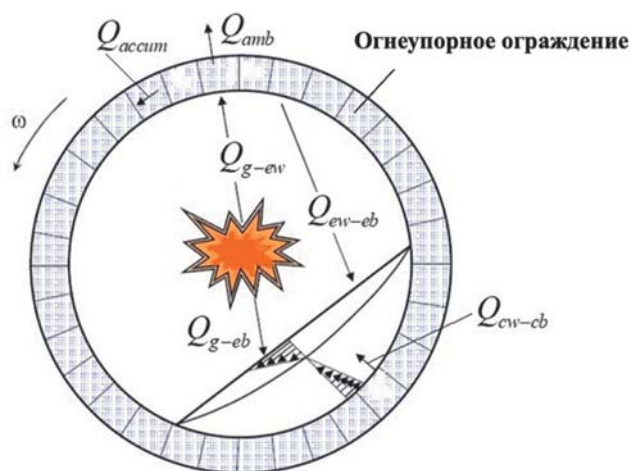


Рис. 1. Концептуальная модель теплопереноса в барабанном реакторе с прямым обогревом при повышенных температурах процесса

посредством сжигания топлива (рис. 1). При этом внутренняя поверхность барабана защищена огнеупорным ограждением. На рис. 1 также показан профиль скоростей в пересышающемся слое материала.

Теплоперенос в барабанном реакторе с прямым обогревом при повышенных температурах процесса моделируется посредством шести тепловых потоков (рис. 1) [4, 11]:

1) Q_{cw-cb} — тепловой поток между стенкой, покрытой материалом (covered wall), и материалом, покрывающим стенку (covered lower bed). Это интегральный тепловой поток, включающий конвективный теплообмен, нестационарную теплопроводность, контактный теплообмен между твердыми частицами и стенкой, покрытой материалом, а также радиационный теплообмен между этими телами;

2) Q_{g-ew} — тепловой поток между газовым объемом и стенкой, свободной от материала (exposed wall), включающий как конвективную составляющую Q_{g-ew}^{conv} , так и радиационную составляющую Q_{g-ew}^{rad} : $Q_{g-ew} = Q_{g-ew}^{conv} + Q_{g-ew}^{rad}$;

3) Q_{g-eb} — тепловой поток между газовым объемом и верхней поверхностью слоя (exposed bed), включающий как конвективную составляющую Q_{g-eb}^{conv} , так и радиационную составляющую Q_{g-eb}^{rad} : $Q_{g-eb} = Q_{g-eb}^{conv} + Q_{g-eb}^{rad}$;

4) Q_{ew-eb} — радиационный тепловой поток между стенкой, свободной от материала, и верхней поверхностью слоя;

5) Q_{amb} — тепловой поток, теряемый через стенку в окружающую среду;

6) Q_{accum} — тепловой поток, аккумулируемый ограждением и обеспечивающий упомя-

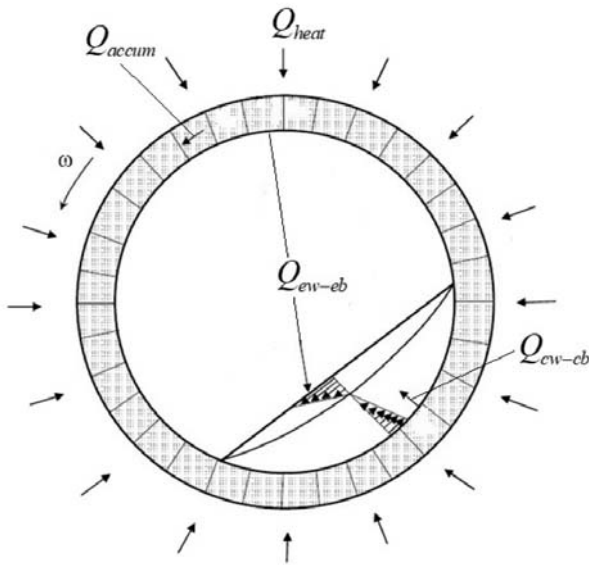


Рис. 2. Концептуальная модель теплопереноса в барабанном реакторе с косвенным обогревом при повышенных температурах процесса

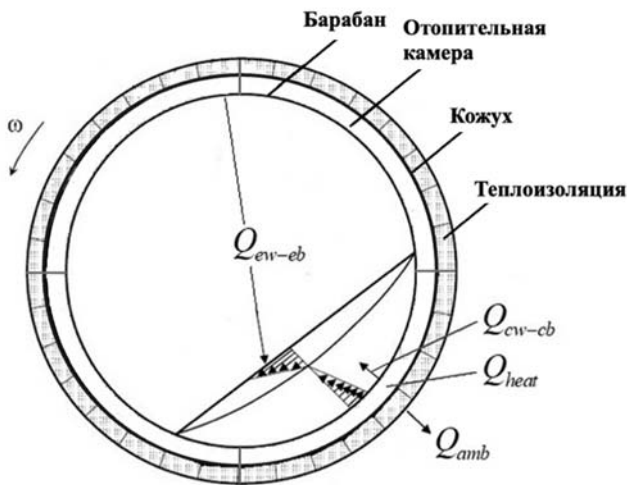


Рис. 3. Концептуальная модель теплопереноса в барабанном реакторе с косвенным обогревом при температуре торрефикации

нутый выше «механизм поглощения – выделения».

В случае косвенного нагрева при повышенных температурах процесса модель теплопереноса меняется [11] (рис. 2). Теплопотребление обеспечивается тепловым потоком Q_{heat} , подводимым извне и равномерно распределенным по наружной поверхности барабана. Во многих случаях может быть использован электроподогрев [11].

Процесс торрефикации, протекающий при температуре около $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, целесообразно реализовать в реакторе с косвенным обогревом (рис. 3). Отопительная камера образована ко-

аксиально размещенными металлическим барабаном и кожухом со слоем теплоизоляции на наружной поверхности. Источником теплоты, создающим тепловой поток Q_{heat} , являются продукты горения топлива, сжигаемого в отопительной камере. В процессах торрефикации топливом может быть торгаз.

Модель теплопереноса для рассматриваемой конструктивной схемы реактора представлена на рис. 3 [10, 12, 13].

Схемы движения материала в барабанном реакторе

Разработка модели теплопереноса должна вестись с учетом характера движения материала в поперечном сечении барабанного реактора.

Характер движения материала (рис. 4) зависит от числа Фруда $Fr = \omega^2 R / g$, где ω — частота вращения барабана, с^{-1} ; R — внутренний радиус барабана, м; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$ [14].

Задача моделирования радиационного теплообмена в барабанной печи является чрезвычайно сложной. В ряде работ предлагается использовать в качестве оценки следующий подход: радиационный теплообмен пренебрежимо мал при температурах $300 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, сопоставим с конвективным теплообменом при $700 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ и является преобладающим при температурах свыше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [15, 16, 4]. В работе [17] принимается, что теплоперенос излучением пренебрежимо мал при температуре менее $527\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Радиационный теплообмен в рабочем пространстве барабанного реактора между материалом, ограждением и газовым объемом может быть исследован численными методами [5 – 7].

В разрабатываемой модели теплообмена целесообразно ввести учет радиационного теплообмена, а в процессе исследования модели оценить его значимость.

Коэффициент теплопередачи в барабанном реакторе с косвенным обогревом

Выберем для разработки математического описания концептуальную модель теплообмена, представленную на рис. 3, и введем геометрические параметры реактора, показанные на рис. 5.

Принимается, что в круговом поперечном сечении барабана с радиусом R_{kilm} материал занимает его часть в виде сегмента (рис. 5). На

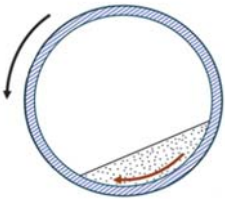
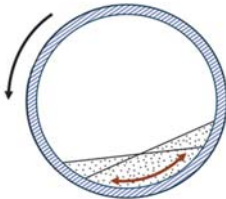
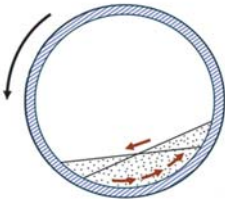
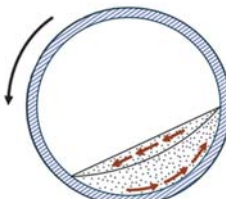
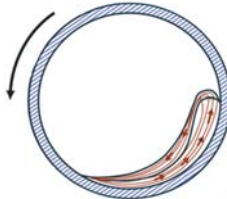
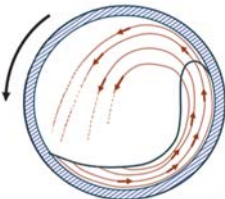
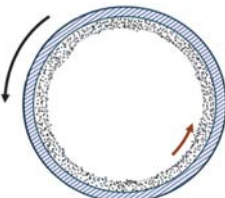
Процесс	Режим		
Скольжение			
	Скользящий $0 < Fr < 10^{-4}$	Колебательный $0 < Fr < 10^{-4}$	
Перемешивание			
	Падающий $10^{-5} < Fr < 10^{-3}$	Пересыпающийся $10^{-4} < Fr < 10^{-2}$	Каскадный $10^{-3} < Fr < 10^{-1}$
Измельчение		Фонтанирующий $0,1 < Fr < 1$	
Центрифугирование		Центрифугирующий $Fr \geq 1$	

Рис. 4. Характеристики движения материала в барабанном реакторе

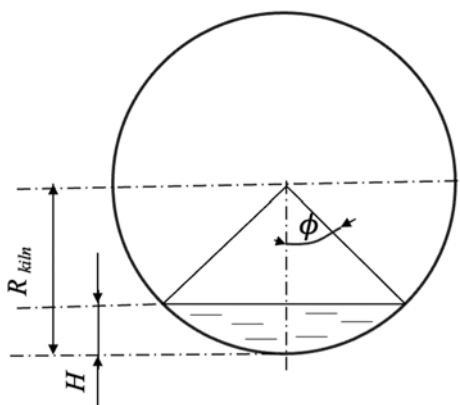


Рис. 5. Поперечный разрез реактора торрефикации

этот сегмент опирается на центральный угол 2ϕ , сегмент имеет высоту H . Несложно показать, что $\phi = \arccos((R_{kiln} - H) / R_{kiln})$.

В анализируемой концептуальной модели передача теплоты от стенки барабана к материалу осуществляется двумя потоками: Q_{cw-cb} и Q_{ew-cb} .

Тепловой поток Q_{cw-cb} характеризуется, согласно [12], эффективным коэффициентом теплопередачи между вращающейся стенкой и слоем материала k_{cw-cb}^{ef} . Этот коэффициент может быть вычислен на основе суммы термического сопротивления тонкого газового подслоя R_1 и термического сопротивления слоя

материала R_2 с учетом радиационного теплообмена. Зависимость для R_1 впервые представлена в работе [18]. В работе [19] показано, что при постоянной степени заполнения барабана материалом коэффициент теплопередачи от барабана к слою материала пропорционален квадратному корню из частоты вращения барабана. На основании экспериментальных и теоретических исследований получено уравнение

$$R_2 = \frac{0,5}{\sqrt{2\lambda_b \rho_b c_b \omega} / \varphi}, \quad (1)$$

где $\lambda_b = (1-\varepsilon)\lambda_s + \varepsilon\lambda_{gas}$ — коэффициент теплопроводности слоя материала, Вт/(м·К); λ_s — коэффициент теплопроводности твердой массы слоя, Вт/(м·К); ε — порозность слоя материала; $c_b = (1-\varepsilon)c_s + \varepsilon c_{gas}$ — удельная теплоемкость слоя материала, Дж/(кг·К); c_s и c_{gas} — удельная теплоемкость твердой массы слоя и торгаза, Дж/(кг·К); $\rho_b = (1-\varepsilon)\rho_s$ — плотность слоя материала, кг/м³; ρ_s — плотность твердой массы слоя материала, кг/м³.

По сравнению с [12] в уравнениях (2) учтен радиационный теплообмен на основе данных работы [4]:

$$R_1 = \frac{1}{k_{cw-cb}}; k_{cw-cb} = \frac{\lambda_{gas}}{\chi \cdot d_p} + k_{rad};$$

$$k_{rad} = 4 \frac{\sigma_0}{1/\varepsilon_w + 1/\varepsilon_b - 1} T_w^3, \quad (2)$$

где d_p — эффективный диаметр частицы материала, м; λ_{gas} — коэффициент теплопроводности газа в рабочем пространстве реактора, Вт/(м·К); k_{wb} — коэффициент теплопередачи через газовый подслой, Вт/(м²·К); k_{rad} — коэффициент радиационной теплоотдачи от стенки барабана к материалу, Вт/(м²·К) [4]; ε_w и ε_b — коэффициенты теплового излучения стенки и материала; T_w — температура внутренней поверхности стенки барабана, К; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана – Больцмана; χ — относительная толщина газового подслоя между стенкой и слоем дисперсного твердого материала (в долях от диаметра частицы), принимается $\chi = 0,085 \dots 0,1$.

Коэффициент теплопередачи рассчитывают по формуле

$$k_{cw-cb}^{ef} = \frac{1}{R_{cw-cb}^{ef}} = \frac{1}{R_1 + R_2}. \quad (3)$$

Здесь R_{cw-cb}^{ef} — эффективное термическое сопротивление для теплового потока Q_{cw-cb} .

Тепловой поток Q_{ew-eb} характеризует перенос теплоты от стенки к газовому потоку внутри барабана и затем от газового потока — к слою материала посредством конвекции [4]. Соответствующий коэффициент теплопередачи k_{ew-eb}^{ef} от стенки к газу и от газа к слою материала рассчитывается по уравнениям (4) – (6) [12]. Уравнения (4) и (5) для термических сопротивлений R_3 и R_4 получены в [20] на основании обработки экспериментальных данных:

$$R_3 = \frac{1}{k_{ew-g}} = \frac{d_e / \lambda_{gas}}{1,54 Re_{gas}^{0,575} Re_{\omega}^{-0,292}}; \quad (4)$$

$$R_4 = \frac{1}{k_{g-eb}} = \frac{d_e / \lambda_{gas}}{0,46 Re_{gas}^{0,535} Re_{\omega}^{0,104} \eta^{-0,341}}; \quad (5)$$

$$k_{ew-eb}^{ef} = \frac{1}{R_{ew-eb}^{ef}} = \frac{1}{R_3 + R_4}, \quad (6)$$

где $d_e = R_{kln}(2\pi - 2\varphi + \sin 2\varphi) / (\pi - \varphi + \sin \varphi)$ — гидродинамический диаметр области, занятой газовой фазой; $Re_{gas} = u_{gas} d_e / \nu$ — число Рейнольдса для газа в осевом направлении; $Re_{\omega} = \omega d_e^2 / \nu$ — число Рейнольдса для газа в направлении вращения барабана; ν — кинематическая вязкость газа, м²/с; $\eta = (2\varphi - \sin 2\varphi) / 2\pi$ — степень заполнения материалом поперечного сечения барабана; R_{ew-eb}^{ef} — эффективное термическое сопротивление для теплового потока Q_{ew-eb} .

Термические сопротивления R_{cw-cb}^{ef} и R_{ew-eb}^{ef} включены параллельно. Согласно электротепловой аналогии, общее термическое сопротивление R_{wb} между стенкой барабана (wall) и слоем материала (bed) определяется из уравнения $1/R_{wb} = 1/R_{cw-cb}^{ef} + 1/R_{ew-eb}^{ef}$.

Пусть α_{conv} — коэффициент конвективной теплоотдачи от потока греющего газа к стенкам отопительной камеры — к наружной поверхности барабана и к кожуху (см. рис. 3). Термическое сопротивление между греющим газом и барабаном выражается уравнением $R_{conv} = 1/\alpha_{conv}$. Продолжая аналогию с электрическими сопротивлениями, можно отметить, что термическое сопротивление R_{conv} включено последовательно с сопротивлением R_{wb} . Таким образом, общее термическое сопро-

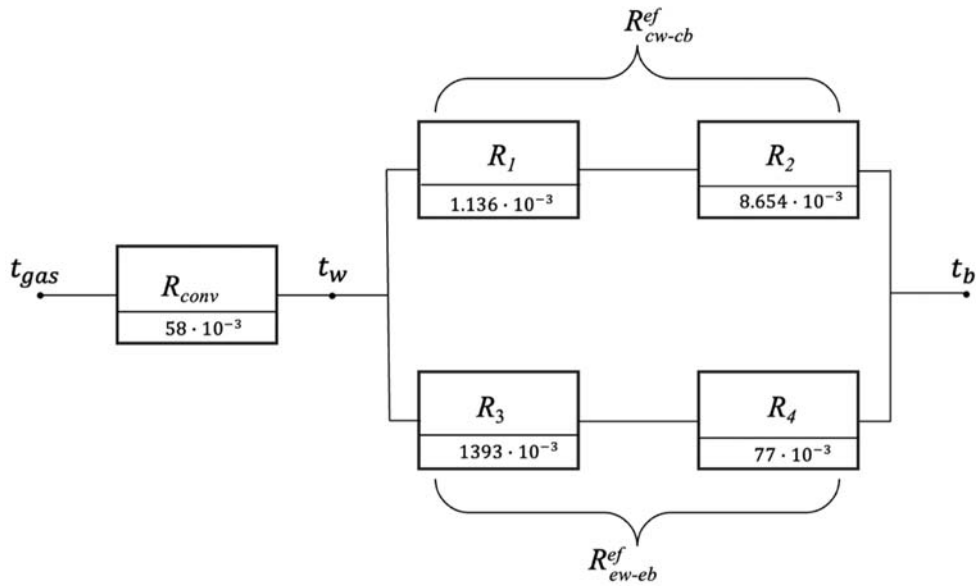


Рис. 6. К аналогии между термическими и электрическими сопротивлениями:

t_{gas} , t_w и t_b — средняя температура греющего газа, стенки барабана и материала

тивление тепловому потоку от греющего газа к материалу рассчитывают по выражению

$$R_{\Sigma} = R_{conv} + R_{wb} = R_{conv} + \frac{R_{ef1} R_{ef2}}{R_{ef1} + R_{ef2}},$$

соответственно коэффициент теплопередачи от греющего газа к материалу, осредненный по поверхности барабана, можно записать как $k_{\Sigma} = 1/R_{\Sigma}$ Вт/(м²·К). Иллюстрирующая аналогию «электрическая цепь» показана на рис. 6.

Результаты исследования

Методика теплового расчета реактора торрефикации древесных пеллет, отапливаемого торгазом, детально изложена в [10, 13]. Расчет выполнен при следующих условиях: радиус барабана — 1,5 м; длина — 43 м; угловая скорость вращения — 6 об/мин; производительность по исходному материалу — 19,1 т/ч (5,306 кг/с); эффективный диаметр частицы — 0,5 мм; порозность слоя материала — 0,8; температура торрефикации — 270 °С; время торрефикации — 30 мин. Число Фруда составляет $1,5 \cdot 10^{-3}$. Согласно рис. 4, в реакторе ожидается процесс перемешивания, режим движения слоя — пересышающийся или каскадный.

Результаты расчета термических сопротивлений без учета радиационного теплообмена представлены на рис. 6. Установлено, что $k_{\Sigma} = 15,0$ Вт/(м²·К), коэффициент теплопередачи между вращающейся стенкой и слоем ма-

териала $k_{cw-cb}^{ef} = 102,5$ Вт/(м²·К), температуры: $t_{gas} = 662$ °С; $t_w = 241$ °С; $t_b = 169$ °С.

Исследуем зависимость коэффициента k_{cw-cb}^{ef} , рассчитанного по формулам (1) – (3) с учетом радиационного теплообмена, от температуры стенки $T_w = t_w + 273$, К. В качестве масштаба (базовой величины) выберем значение этого коэффициента без учета радиационного теплообмена: $k_{base} = 102,5$ Вт/(м²·К). Искомая зависимость безразмерного коэффициента $\bar{K} = k_{cw-cb}^{ef} / k_{base} = f(T_w)$ представлена на рис. 7.

В диапазоне температур торрефикации до 700 К учет радиационного теплообмена приво-

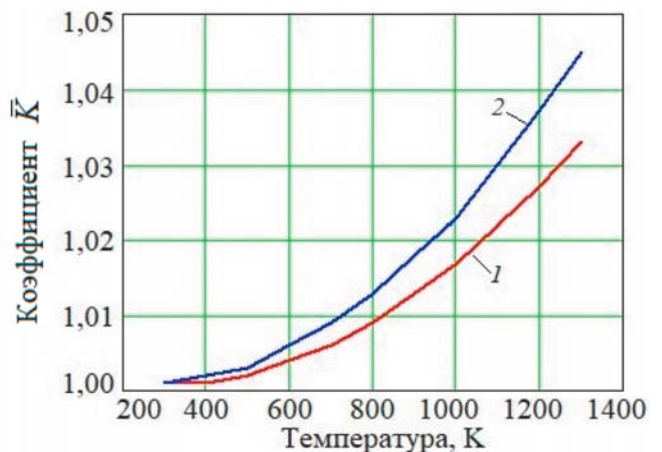


Рис. 7. К оценке влияния радиационного теплообмена на коэффициент теплопередачи:

1 — $\omega = 0,1$ с⁻¹ (6 об/мин); 2 — $\omega = 0,2$ с⁻¹ (12 об/мин)

дит к увеличению рассматриваемого коэффициента теплопередачи не более, чем на 1 %. С повышением температуры технологического процесса до 1300 К учет радиационного теплообмена проявляется в росте k_{cw-cb}^{ef} на 3,3 – 4,5 % в зависимости от скорости вращения барабана.

Выводы

1. На основе анализа концептуальных моделей теплопереноса в барабанных реакторах при различных температурных уровнях технологического процесса выбрана модель, соответствующая процессу торрефикации биомассы в реакторе с косвенным обогревом.

2. Для данной модели представлены уравнения для определения значения коэффициента теплопередачи от греющего теплоносителя к материалу. Предложен способ учета радиационного теплообмена между стенкой барабана и движущимся слоем материала, подвергающегося торрефикации.

3. Установлено, что в диапазоне температур торрефикации (до 700 К) учет радиационного теплообмена приводит к увеличению коэффициента теплопередачи от стенки барабана к материалу не более, чем на 1 %. Получен результат, согласующийся с [17]: в барабанном реакторе с косвенным обогревом теплоперенос излучением пренебрежимо мал при температуре менее 800 К.

4. С повышением температуры технологического процесса до 1300 К учет радиационного теплообмена сопровождается ростом данного коэффициента теплопередачи не более, чем на 3,3 – 4,5 % в зависимости от частоты вращения барабана. При этом увеличение коэффициента теплопередачи от греющего газа к материалу еще меньше.

5. Инженерная методика определения коэффициентов теплопередачи в барабанном реакторе с косвенным обогревом рекомендуется для конструктивных расчетов и разработки реакторов торрефикации.

Список литературы

- Ходоров, Е. И. Печи цементной промышленности / Е. И. Ходоров. — Л.: Стройиздат, 1968.
- Диомидовский, Д. А. Печи цветной металлургии / Д. А. Диомидовский. — М.: Металлургиздат, 1959.
- Лисиенко, В. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология. Книга 2 / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. — М.: Теплотехник, 2004.
- Li, S-Q. A mathematical model of heat transfer in a rotary kiln thermo-reactor / Li S-Q, Ma L-B, Wan W, Yao Q. // Chem Eng Technol 2005;28:1480–9. — DOI: 10.1002/ceat.200500241.
- Бухмиров, В. В. Совершенствование тепловой работы вращающихся печей на основе математического моделирования газодинамики и сложного теплообмена. — Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Бухмиров Вячеслав Викторович. — М., 1983.
- Бухмиров, В. В. Моделирование сопряженного теплообмена в рабочем пространстве обжиговой вращающейся печи. — Автореферат дис. ... док. техн. наук: 05.16.02 / Бухмиров Вячеслав Викторович. — М., 1998.
- Арутюнов, В. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников. — М.: Металлургия, 1990.
- Трубаев, П. А. Методы компьютерного моделирования горения и теплообмена во вращающихся печах / П. А. Трубаев, В. А. Кузнецов, П. В. Беседин. — Белгород: Изд-во БГТУ; БИЭИ, 2008.
- Кузнецов, В. А. Особенности расчета нестационарного теплообмена в стенах вращающихся печей / В. А. Кузнецов // Энергетические системы. — 2022. — № 3, 002. — С. 17– 27.
- Валинеева, А. А. Повышение эффективности установок торрефикации гранулированного биотоплива на основе исследования его низкотемпературного пиролиза. — Автореферат дис.... канд. техн. наук : 2.4.6. / Валинеева Анна Александровна. — М., 2024.
- Yogesh, Sonavane. Influence of the Wall on the Heat Transfer Process in Rotary Kiln / Yogesh Sonavane. — 2010. — <https://clck.ru/3MbQfQ>.
- Manouchehrinejad, M. (2019). Process Simulation of an Integrated Biomass Torrefaction and Pelletization (iBTP) Plant to Produce Solid Biofuels / M. Manouchehrinejad, S. Mani // Energy Convers. Manag. X 1, 100008. — DOI: 10.1016/j.ecmx.2019.100008.
- Валинеева, А. А. Разработка реактора торрефикации древесных пеллет / А. А. Валинеева, С. К. Попов // Актуальные вопросы энергетики. — 2024. — Т. 6. — № 1. — С. 2 – 9.
- Baby-Jean Robert Mungyeke, Bisulandu. Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications / Baby-Jean Robert Mungyeke Bisulandu, Florian Huchet // Applied Thermal Engineering, 2023, 221, pp. 119637. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119637.hal-04102335.
- Gorog, J. P. Radiate Heat Transfer in Rotary Kilns / J. P. Gorog, J. K. Brimacombe, T. N. Adams // Metallurgical Transactions B, vol. 12B, pp. 55 – 64, 1981. — <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02674758>.
- Gorog, J. P. Regenerative Heat Transfer in Rotary Kilns / J. P. Gorog, T. N. Adams, J. K. Bri-

- macombe // Metallurgical Transactions B, vol. 13B, pp. 153 – 160, 1982. — <https://opendata.uni-halle.de/bitstream/1981185920/10751/1/silagustini.pdf>.
17. **Nhuchhen, D. R.** Investigation into overall heat transfer coefficient in indirectly heated rotary torrefier / D. R. Nhuchhen, P. Basu, B. Acharya // Int J Heat Mass Transf 2016;102:64-76. — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.011.
 18. **Schlunder, E. U.** Particle heat transfer / E. U. Schlunder // International Heat Transfer Conference 7. — Munchen. — 1982. — P. 195 – 211. DOI: 10.1615/IHTC7.4290.
 19. **Wes, G. W. J.** Heat transfer in a horizontal rotary drum reactor / G. W. J. Wes, A. A. H. Drinkenburg, S. Stemerding // Powder Tehnology. — 1976. — 13(2). P. 185 – 192. DOI: 10.1016/0032-5910(76)85003-6.
 20. **Tscheng, S. H.** Convective heat transfer in a rotary kiln / S. H. Tscheng, A. P. Watkinson // The Canadian Journal of Chemical Engineering. — 1979. — 57(4). P. 433 – 443. DOI: 10.1002/cjce.5450570405.
- ### References
1. **Khodorov E. I.** *Pechi tsementnoi promyshlennosti* (Cement industry kilns), Leningrad, Stroyizdat, 1968.
 2. **Diomidovskii D. A.** *Pechi tsvetnoi metallurgii* (Non-ferrous metallurgy furnaces), Moscow, Metallurgizdat, 1959.
 3. **Lisienko V. G., Shchelokov Ya. M., Ladygichev M. G.** *Vrashchayushchiesya pechi: teplotekhnika, upravlenie i ekologiya. Kniga 2* (Rotary Kilns: Thermal Engineering, Control and Ecology. Book 2), Moscow, Heating engineer, 2004.
 4. **Li S-Q, Ma L-B, Wan W., Yao Q.** A mathematical model of heat transfer in a rotary kiln thermo-reactor, Chem Eng Technol 2005, No. 28, pp. 1480 – 9, DOI: 10.1002 / ceat.200500241.
 5. **Bukhmirov V. V.** *Sovershenstvovanie teplovoi raboty vrashchayushchikhsya pechei na osnove matematicheskogo modelirovaniya gazodinamiki i slozhnogo teploobmena* (Improving the thermal performance of rotary kilns based on mathematical modeling of gas dynamics and complex heat exchange), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Moscow 1983.
 6. **Bukhmirov V. V.** *Modelirovanie sopryazhennogo teploobmena v rabochem prostranstve obzhigovoi vrashchayushcheisya pechi* (Modeling of conjugate heat transfer in the working space of a rotary kiln), Abstract of the thesis for the degree of Doctor of Tech. Scien., Moscow, 1998.
 7. **Arutyunov V. A., Bukhmirov V. V., Krupennikov S. A.** *Matematicheskoe modelirovanie teplovoi raboty promyshlennykh pechei* (Mathematical modeling of thermal operation of industrial furnaces), Moscow, Metallurgy, 1990.
 8. **Trubaev P. A., Kuznetsov V. A., Besedin P. V.** *Metody komp'yuternogo modelirovaniya gorenija i teploobmena vo vrashchayushchikhsya pechakh* (Methods of computer modeling of combustion and heat transfer in rotary kilns), Belgorod, Publishing house BSTU, 2008.
 9. **Kuznetsov V. A.** *Energeticheskie sistemy* (Energy Systems), 2022, No. 3, 002, pp. 17 – 27.
 10. **Valineeva A. A.** *Povyshenie effektivnosti ustanovok torrefikatsii granulirovannogo biotopliva na osnove issledovaniya ego nizkotemperaturnogo piroliza* (Improving the efficiency of granulated biofuel torrefaction plants based on the study of its low-temperature pyrolysis), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Moscow, 2024.
 11. **Sonavane Y.** Influence of the Wall on the Heat Transfer Process in Rotary Kiln, 2010, [Electronic resource]. — URL: <https://clck.ru/3MbQfQ>.
 12. **Manouchehrinejad M., Mani S.** Process Simulation of an Integrated Biomass Torrefaction and Pelletization (iBTP) Plant to Produce Solid Biofuels, 2019, Energy Convers. Manag. X1, pp. 100008, DOI: 10.1016/j.ecmx.2019.100008.
 13. **Valineeva A. A., Popov S. K.** *Aktual'nye voprosy energetiki* (Actual Issues Of Energy), 2024, No. 1, Vol. 6, pp. 2 – 9.
 14. **Bisulandu BJRM, Huchet F.** Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications, Applied Thermal Engineering, 2023, 221, pp. 119637, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119637.hal-04102335.
 15. **Gorog J. P., Brimacombe J. K., Adams T. N.** Radiate Heat Transfer in Rotary Kilns, Metallurgical Transactions B, 1981, Vol. 12B, pp. 55 – 64, [Electronic resource]. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02674758>.
 16. **Gorog J. P., Adams T. N., Brimacombe J. K.** Regenerative Heat Transfer in Rotary Kilns, Metallurgical Transactions B, 1982, Vol. 13B, pp. 153 – 160, [Electronic resource]. — URL: <https://opendata.uni-halle.de/bitstream/1981185920/10751/1/silagustini.pdf>.
 17. **Nhuchhen D. R., Basu P., Acharya B.** Investigation into overall heat transfer coefficient in indirectly heated rotary torrefier, Int J Heat Mass Transf 2016, 102, pp. 64 – 76, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.011.
 18. **Schlunder E. U.** Particle heat transfer, International Heat Transfer Conference 7, Munchen, 1982, pp. 195 – 211, DOI: 10.1615/IHTC7.4290.
 19. **Wes G. W. J., Drinkenburg A. A. H., Stemerding S.** Heat transfer in a horizontal rotary drum reactor, Powder Tehnology, 1976, No. 13(2), pp. 185 – 192, DOI: 10.1016/0032-5910(76)85003-6.
 20. **Tscheng S. H., Watkinson A. P.** Convective heat transfer in a rotary kiln, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1979, No. 57(4), pp. 433 – 443, DOI: 10.1002/cjce.5450570405.

PopovSK@mpei.ru

Дата поступления 12.04.2025

Дата принятия к публикации 25.05.2025

Simulation of heat-exchange in a drum reactor with indirect heating

Popov S. K., Valineeva A. A., Svistunov I. N.

Heat transfer is an important factor limiting the productivity of rotating drum reactors with direct and indirect heating of the crumbling layer of material. Based on the analysis heat transfer conceptual models at different temperatures of material processing, a model corresponding to the process of biomass torrefaction in an indirectly heated reactor was selected. For the selected model, the equations for determining the heat transfer coefficient from the heating carrier to the material are presented. A method for accounting for radiative heat transfer between the drum wall and a moving layer of material undergoing torrefaction is proposed. It was found that in the torrefaction temperature range (up to 700 K), consideration of radiative heat transfer leads to an increase in the heat transfer coefficient from the drum wall to the material by no more than 1%. With an increase in the temperature of the technological process to 1300 K, accounting for radiative heat transfer is accompanied by an increase in the heat transfer coefficient by no more than 3.3 – 4.5%. The proposed engineering methodology for determining heat transfer coefficients is recommended for constructive calculations of reactor reactors.

Keywords: Drum reactor, indirect heating, torrefaction, mathematical modeling, heat and mass transfer, radiative heat transfer.

DOI: 10.71759/6459-tq92

Специальность 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Направления повышения эффективности высокотемпературных теплотехнологических установок

Глазов В. С., канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Представлен обзор работ, посвященных методам, используемым в методологии повышения энергетической эффективности топливных высокотемпературных теплотехнологических установок, работающих на природном газе. Отмечена ограниченность применяемых методов и указаны решения, способные преодолеть выявленные ограничения.

Ключевые слова: эффективность, термохимическая регенерация, интенсификаторы теплообмена, оптимизация теплообмена, фильтруемая тепловая изоляция, теплофизические свойства, труба Фильда, утилизация тепловых отходов, стекловаренная установка, тепловая схема.

Рост стоимости и объемов потребления ископаемых источников энергии при конечности их запасов является той причиной, которая побуждает снижать долю неиспользуемой части энергии посредством утилизации тепловых отходов, повышать эффективность теплообменного оборудования, совершенствовать теплотехнологические установки и системы.

Современные высокотемпературные теплотехнологические установки (ВТУ) представляют собой сложные тепловые агрегаты, состоящие из собственно печи и вспомогательного оборудования. В качестве примера на рис. 1 представлена стекловаренная установка, включающая ванную рекуперативную печь и комплекс теплоутилизационного оборудования. Мероприятия по повышению эффективности использования энергии в установке могут быть реализованы как в самой печи, так и в элементах установки.

В ВТУ в качестве топлива широко используется природный газ (ПГ), на который приходится более половины в структуре энергетического баланса России. Только часть энергии, выделяющейся при сжигании ПГ, идет на придание выпускаемому продукту заданных свойств, т.е. полезно используется.

Значительную долю тепловых отходов ВТУ составляют тепловые потоки с дымовыми газами (ДГ) и через наружные ограждения (НО) агрегатов.

Так, в стекловаренных установках только приблизительно 1/4 часть энергии, полученной при сжигании топлива, используется полезно, а остальная часть отводится из печи

с ДГ и через НО [1]. В этой связи целесообразно снижение доли неиспользуемой энергии (тепловых отходов) для повышения эффективности теплотехнологических установок. Решение этой задачи осуществляется в рамках методологии, в основе которой лежат методы, опирающиеся на физико-химические модели процессов, протекающих в ВТУ и вспомогательном оборудовании. Степень адекватности этих моделей, а также возможность варьирования используемых в них факторов, влияющих на организацию и интенсификацию теплотехнологического процесса, определяют энергетическую эффективность ВТУ.

Материалы и методы

Объектом исследования являются элементы теплоиспользующего оборудования — поверхности и каналы с интенсификаторами теплообмена в виде выступов и углублений, элементы теплотехнических установок, подвергаемые воздействию теплового излучения в условиях фильтрации теплоносителя или химических реакций, а также ВТУ, в которых осуществляется термохимическая регенерация (ТХР) теплоты высокотемпературных продуктов сгорания топлива. Предмет исследований — тепломассообменные процессы, которые способны обеспечить экономию ПГ за счет ТХР и поверхностных интенсификаторов теплообмена. В настоящей статье представлен обзор энергосберегающих мероприятий, применяемых для повышения эффективности топливных ВТУ, работающих на природном газе.

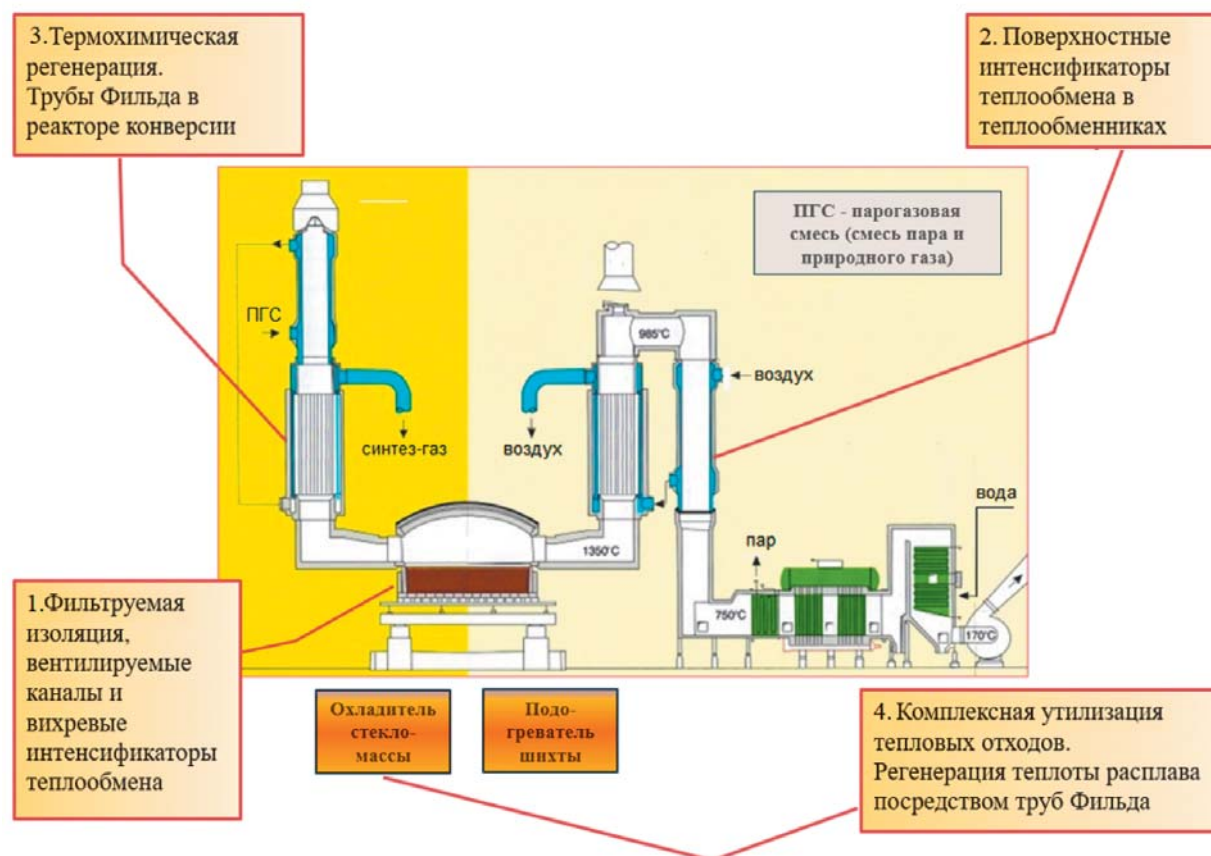


Рис. 1. Стекловаренная печь и мероприятия по повышению ее энергетической эффективности

Аналізу подвергнуты в основном публикации, в которых отражены результаты трёх методов исследования: эксперимент, теория и численное моделирование.

Анализ энергосберегающих мероприятий

Рассмотрим энергосберегающие мероприятия, представленные на рис. 1.

1. Снижение тепловых потерь через наружное ограждение ВТУ. Согласно [2], одним из важнейших критериев оценки эффективности ВТУ является отношение нерегенерируемого потока теплоты в окружающую среду Q_{oc} через ограждение рабочего пространства ВТУ к технологическому теплотреблению процесса $Q_{тех}$. Влияние Q_{oc} на расход топлива ВТУ определяется соотношением $b/b_0 = (1 + Q_{oc}/Q_{тех})$, где b и b_0 — фактический и теоретически минимальный удельные расходы топлива.

Традиционный путь снижения Q_{oc} связан с увеличением термического сопротивления обмуровки посредством использования многослойных ограждений и новых теплоизоляционных материалов, обладающих малым коэф-

фициентом теплопроводности и достаточной огнеупорностью. Однако в ряде случаев увеличение толщины ограждения печи может оказаться невыгодным, так как прирост её стоимости может значительно превысить стоимость сэкономленного топлива. Поэтому в работах [3 – 5] рекомендуется использовать альтернативное решение по снижению Q_{oc} , основанное на применении проницаемых стенок — фильтруемой тепловой изоляции.

На рис. 2 приведены примеры организации фильтруемой изоляции (ФИ) в НО ВТУ. Её использование в НО ВТУ повышает термостойкость конструкции путем организации направленного вдува воздуха через проницаемые участки ограждения, что обеспечивает охлаждение теплонапряженных участков [5, 6]. Оно также способствует сокращению удельного расхода топлива [2, 3] посредством снижения потерь теплоты в окружающую среду [5, 6] и частичной регенерации Q_{oc} . Воздух, проходя через ФИ и осваивая часть потока Q_{oc} , далее может быть направлен в горелки или на подогрев шихтовых материалов [2, 3].

В публикации [2] утверждается, что применение пористой теплоизоляции с подачей ох-

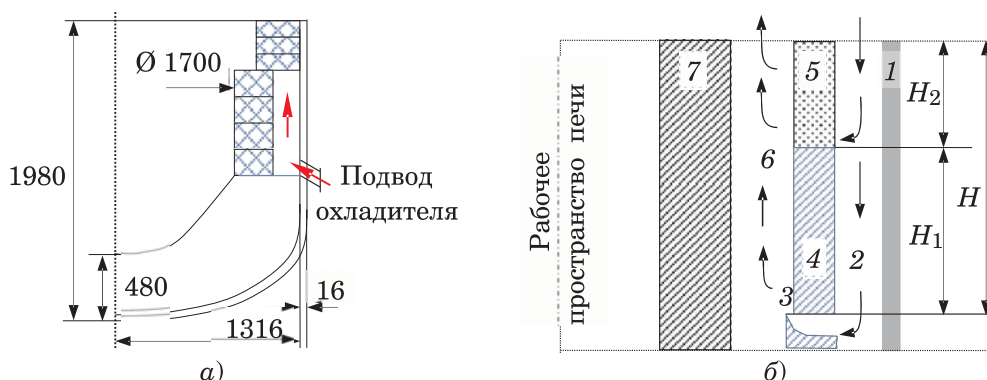


Рис. 2. Конструкция футеровки электродуговой печи ДСП-3 с конвективным охлаждением [5] (а); футеровка-ограждение металлургической печи (б) [3]:

1 — кожух; 2 — полость для подачи охлаждающего воздуха; 3 — канал (щель); 4 — газонепроницаемый огнеупорный слой; 5 — газопроницаемый участок из пористой керамики; 6 — полость для ввода подогретого воздуха, соединенная с горелочными устройствами; 7 — газоплотный огнеупорный слой

ладителя — холодного воздуха — навстречу потоку теплоты в плавильных камерах уменьшает тепловой поток через ограждение на два порядка (с 1977 до 13 Вт/м).

Обоснование необходимости защиты поверхностей ВТУ от воздействия высокотемпературного газового потока и уменьшения теплового потока Q_{oc} приведено в работах [2 – 5]. Там же изложены технические решения по снижению Q_{oc} .

Анализ работ, посвященных целесообразности применения фильтруемой изоляции в ограждении ВТУ, вскрыл различие в методах расчета и противоречивость отдельных результатов. Оказалось, что основным источником противоречий являются допущения и упрощения, которые использовали авторы для получения решений, описывающих теплообмен в пористых телах [7, 8]. Так, использование условия равенства температур теплоносителя и твердого скелета материала стенки позволяет уйти от детального описания её структурного разнообразия. Однако оно же породило новую проблему. Качественный её анализ показывает [7, 8]:

подвод теплового излучения к проницаемой стенке может привести к тому, что температура на её противоположной стороне может стать выше среднemasсовой температуры фильтрующегося воздуха на выходе из стенки. Поэтому возникающий при этом скачок температуры воздуха должен быть учтен конкретным механизмом переноса теплоты;

поглощение излучения пористым материалом происходит не на его границе, а в его объеме. Это необходимо учитывать при формиро-

вании модели, описывающей процессы переноса в таком материале.

В работе [9] высказана идея изменения рельефа поверхности пористого теплоизоляционного слоя путем нанесения лунок, с помощью чего можно значительно повысить эффективность работы фильтруемой изоляции. Авторами [9] выполнено математическое моделирование, но не представлены модель и результаты расчета. Изложены векторная диаграмма движения воздуха вдоль предложенной конструкции пористого слоя и качественный вывод о значительной интенсификации теплоотдачи, вызванной образованием устойчивого вихря у фронтальной части лунки.

Используемое в ряде работ описание переноса теплоты через НО с ФИ в рамках решения задачи повышения эффективности ВТУ не учитывает нюансы, способные повлиять на значение регенерируемого теплового потока. Это относится к описаниям, которые основаны на моделях с сосредоточенными параметрами, в приближении не смыкающихся пограничных слоев, высокого коэффициента теплоотдачи между фильтруемым воздухом и стенками пористого теплозащитного материала, а также на пренебрежении объемным механизмом поглощения теплового излучения пористыми материалами.

Такой подход может привести к заметной погрешности в оценке температуры подогрева воздуха в каналах наружного ограждения и, как следствие, к неадекватной оценке изменения эффективности ВТУ. Целесообразно провести более детальное моделирование, сни-

мающее указанные проблемы. При этом необходимо выполнить:

а) корректировку описания граничных условий и уравнения сохранения энергии, обычно представляемого в виде уравнения теплопроводности, в задачах нагрева твердых пористых тел излучением с эффективными теплофизическими свойствами (ТФС). Причина в том, что источник теплоты, формируемый под воздействием внешнего излучения, может располагаться не на поверхности нагреваемого тела, а в приграничной области или даже во всем его объеме;

б) создание для такой модели новых методов определения ТФС пористых полупрозрачных материалов, которые должны быть основаны не на сведении всех составляющих сложного теплообмена к доминирующему механизму, а учитывать их действие совместно и в явном виде.

В качестве основы для такого моделирования можно использовать литературу [10, 11].

С целью определения ТФС пористых полупрозрачных тел, нагреваемых излучением, применялась методика, изложенная в работах [12, 13]. Первая реализация этой методики была выполнена на модели пористого полупрозрачного тела, представляющего собой пакет из слоев текстильного материала [11 – 13]. В 2021 г. автором была проведена модернизация методики. В неё был введен изменяющийся во времени поток внешнего излучения, и процесс нагрева разбит на два этапа. Первый этап соответствует начальному этапу нагрева, а второй — постоянной величине падающего потока излучения и известному распределению температуры в образце на момент начала этого этапа. Модернизированная методика реализована в работе [3] под руководством и при непосредственном участии автора данной статьи.

Дальнейшее повышение эффективности работы ВТУ можно достичь применением вихревых интенсификаторов теплообмена в вентилируемых каналах НО. Целесообразность такого решения обоснована в литературе [7 – 9].

2. Снижение тепловых потерь с уходящими ДГ. Данная процедура может быть реализована в рамках регенеративных тепловых схем посредством конвективных и радиационных теплообменных аппаратов (ТА). Одно из направлений повышения эффективности конвективных ТА — применение по-

верхностных интенсификаторов теплообмена. Среди пассивных методов интенсификации выделяются лунки, которые, по мнению ряда исследователей [14 – 16], обеспечивают вихревую интенсификацию теплообмена (ВИТ) и имеют достоинства, которые проявляются в опережающем росте относительного коэффициента теплоотдачи по сравнению с ростом относительного коэффициента сопротивления. Более того, генерируемые лунками в пограничный слой вихри препятствуют осаждению загрязнений на поверхности теплообменных пластин, что повышает эксплуатационную надежность аппарата и снижает необходимую мощность вытяжных вентиляторов [14].

С целью интенсификации конвективного теплообмена используют выступы разной формы. В фундаментальных трудах Л. И. Ройзена и И. Н. Дулькина [17], Д. Керна и А. Крауса [18], а также других ученых большое внимание уделено ребрам, которые отличаются по форме и наносятся на плоские и цилиндрические поверхности. Там же представлены в одно- и двумерной постановках задачи по оптимизации параметров ребер, имеющих разную форму. Решения, представленные в этих работах, получены при известном либо заданном коэффициенте теплоотдачи, когда целевой функцией является минимальная масса ребра или максимальный тепловой поток через его основание. Оптимизацию параметров одиночного ребра авторы проводят в условиях симметричного теплообмена на его боковых поверхностях, полагая, что ребро является термически тонким телом (число Био $Bi \leq 0,61$ [17]). При этом они не учитывают ограничение, накладываемое на допустимую толщину ребра, которая влияет на максимум теплового потока и может выбираться по соображениям прочности или допустимого веса конструкции ТА. Кроме того, эффективность ребра определяют при условии равенства коэффициентов теплоотдачи для реального и идеального ребра, что допустимо только для теплоносителей, ТФС которых не зависят от температуры омываемой поверхности ребра. Наряду с этим, при выборе материала ребра по значению его эффективности проявляется неоднозначность в принятии решения. Причина в том, что для одной и той же эффективности существует бесконечно большое количество пар чисел (коэффициента теплоотдачи α и коэффициента теплопроводности λ), при которых тепловые потоки будут отличаться друг от друга по своим

величинам. Большому значению α потребуется большее значение λ , чтобы соответствовать заданной эффективности ребра. Высокие значения α и λ приводят к увеличению стоимости ТА, что во многих случаях не является желаемым. Поэтому для однозначного выбора материала ребра, обеспечивающего максимальный тепловой поток, в работе [19] рекомендован альтернативный критерий для определения эффективности одиночного ребра.

Поскольку в ТА коэффициент теплоотдачи зависит от геометрии канала, форму которого определяют ребра **конечных** размеров, то представленные в указанных выше работах формулы требуют корректировки ввиду следующих причин: получены в рамках одномерного приближения; не определяют экстремальные значения теплового потока во внешнюю среду и поэтому не позволяют установить оптимальные геометрические характеристики канала вместе с режимными параметрами организуемого процесса, которые способны обеспечить эффективную теплоотдачу конвекцией [17, 19]. Это же касается и эмпирических формул для определения коэффициента теплоотдачи α , так как область их применения ограничена способом выбора характерного линейного размера (гидравлического диаметра d_r или длины поверхности теплообмена l), который не должен противоречить условию одномерного приближения, использованного в задачах оптимизации параметров одиночного ребра.

3. Анализ способов утилизации тепловых отходов топливных ВТУ. Обзор энергосберегающих мероприятий, применяемых в ВТУ, показал редкое использование термохимической регенерации (ТХР) теплоты газовых отходов $Q_{г.о}$ [20]. Технология ТХР основана на эндотермическом процессе конверсии исходного органического топлива, в ходе которого поглощается теплота высокотемпературных дымовых газов. В результате образуется вторичное топливо — синтез-газ, направляемый на отопление ВТУ [20]. Одна из причин ограниченности масштабов проектирования и внедрения установок с ТХР связана с трудностью математического моделирования процессов тепло- и массообмена и гидродинамики с неравновесными химическими превращениями, значительными лучистыми потоками, существенной переменностью теплофизических свойств в аппаратах со сложной геометрией проточной части [1]. В связи с этим возникает потребность в разработке ма-

тематических моделей, программ и эффективных методик для исследования способов экономии ПГ посредством ТХР тепловых отходов, в оценке целесообразности их применения в теплотехнологических установках.

4. Регенеративное использование теплоты технологического продукта на стадии его охлаждения. Данное энергосберегающее мероприятие является перспективным техническим решением для ряда ВТУ. Например, в стекловаренной установке можно регенерировать теплоту расплава стекломассы, рассеиваемую через ограждение студочной зоны $Q_{стм}$. С этой целью можно использовать ТА, состоящие из труб Фильда. Обзор литературы, посвященной теплотехническому расчету труб Фильда, показал, что привлекаемые для этой цели модели являются одномерными и существенно упрощенными. Так, в публикациях [21] и [22] представлены аналитические модели, описывающие теплообмен в трубе Фильда при условии идеального перемешивания теплоносителя в её тупиковой зоне. Такое допущение приводит к равенству температур теплоносителя на выходе центрального и на входе кольцевого каналов. Это упрощает процесс моделирования и позволяет аналитическим методом установить связь между искомыми и исходными величинами. Отличие отмеченных моделей друг от друга проявляется в записи одного из трех уравнений, в котором схожие слагаемые имеют разные знаки.

Опыт и качественный анализ выполнения условия идеального перемешивания в тупиковой зоне указывают на то, что её размер, режим течения теплоносителя и внешние условия теплообмена играют важную роль в процессе выравнивания упомянутых температур [1, 8].

Практика численного моделирования показывает, что совершенствование методов расчета труб Фильда возможно посредством программных инструментов, позволяющих провести параметрическое 3D-моделирование процесса в трубе Фильда и определить области её эффективного использования, например, в аппаратах системы комплексной утилизации тепловых отходов ВТУ [1].

5. Оценка эффективности энергосберегающих мероприятий. Среди публикаций, посвященных формированию и исследованию энергосберегающих тепловых схем стекловаренной установки, представляют ин-

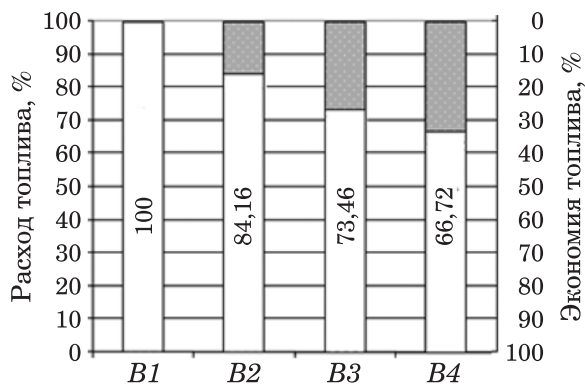


Рис. 3. Расход и экономия топлива в вариантах схем утилизации тепловых отходов стекловаренной установки производительностью 16 т/сут:

B1 — схема с термической регенерацией $Q_{г.о}$; *B2* — схема с термической регенерацией $Q_{г.о}$ и $Q_{стм}$; *B3* — схема с термохимической и термической регенерацией $Q_{г.о}$; *B4* — схема с термохимической и термической регенерацией $Q_{г.о}$ и $Q_{стм}$

терес работы [1, 7, 8], выполненные под научным руководством автора данной статьи.

Результаты сопоставительного анализа энергосберегающего эффекта от применения рассмотренных в [1, 3] тепловых схем приведены на рис. 3.

Видно, что утилизация тепловых отходов посредством термохимической регенерации и использованием системы предварительного подогрева шихты и окислителя за счет тепловых потоков $Q_{г.о}$ и $Q_{стм}$ (схема *B4*) приводит к повышению коэффициента полезного использования энергии на 21,95 % по сравнению с термической регенерацией $Q_{г.о}$ посредством подогрева воздуха горения (схема *B1*). Из рис. 5 следует, что для установки 16 т/сут переход от схемы *B1* к схеме *B4* позволяет сэкономить топливо на 33,3 % и уменьшить затраты природного газа на 0,284 млн м³ в год.

Комплексное применение всех исследованных энергосберегающих мероприятий для стекловаренных печей может дать энергосберегающий эффект до 50 %.

Выводы

1. Достоинство или преимущество той или иной методологии, способствующей достижению поставленной цели, определяется совокупностью и последовательностью тех методов, которые используются в её инструментарии. Поэтому актуальна задача разработки методологии как совокупности методов, обеспечивающих повышение энергетической эф-

фективности ВТУ, использующих природный газ как топливо.

2. Учитывая результаты проведенного анализа, приходим к выводу о необходимости разработки методологии, лишенной отмеченных выше проблем. В неё должны войти инновационные методы расчета и научно-технические решения по созданию энергосберегающих технологий, минимизирующих потребление природного газа как топлива на основе: использования термохимической регенерации теплоты продуктов его сгорания; применения эффективного теплообменного оборудования, использующего вихревые интенсификаторы теплообмена; обобщения данных, полученных методами физического и математического моделирования.

Список литературы

1. Ву Ван Чьен. Использование труб Фильда в аппаратах системы комплексной утилизации тепловых отходов высокотемпературных установок: Автореф. дис. канд. техн. наук. — М.: «НИУ «МЭИ», 2012. — 20 с.
2. Горюнова И. Ю. Повышение эффективности ванн стекловаренных печей на базе применения фильтруемой изоляции рабочего пространства: Автореф. дис. канд. техн. наук. — М.: МЭИ, 1988. — 20 с.
3. Футеровка-ограждение металлургической печи: а.с. 1354016 СССР. № 4170832/31-02 / Говорухин Л. Н., Косенков В. И., Сергиевский Э. Д.; заявл. 31.12.86; опубли. 23.09.88, Бюл. № 35. 2 с.
4. Перелетов И. И., Митрохин Ю. С. Повышение энергетической эффективности камерных нагревательных печей за счет применения фильтруемого ограждения рабочего пространства / И. И. Перелетов, Ю. С. Митрохин // Изв. ВУЗов — Энергетика. — 1989. — № 12. — С. 82–86.
5. Алимгазин, А. Ш. Комплексное исследование газодинамики и теплообмена в ограждении теплотехнологической установки / А. Ш. Алимгазин, А. Х. Акишев, Ю. А. Мартынов, С. Н. Харламов, В. П. Мотулевич, Э. Д. Сергиевский // Теплоэнергетика. — 1988. — № 5. — С. 69–71.
6. Хоанг, Х. Х. Исследование сложного теплообмена в трубах Фильда и их использование в энергосберегающей схеме стекловаренной установки: Автореф. дис. канд. техн. наук. — М.: МЭИ, 2010. — 20 с.
7. Васильева, Н. И. Моделирование теплообменных процессов в каналах теплотехнологических промышленных установок с учетом влияния внешних факторов: Автореф. дис. канд. техн. наук. — М.: МЭИ, 2005. — 20 с.
8. Ву Си Ки. Повышение эффективности высокотемпературной установки посредством вихревых интенсификаторов теплообмена

- в каналах наружного ограждения: Автореф. дис. канд. техн. наук. — М.: МЭИ, 2021. — 20 с.
9. **Сергиевский, Э. Д.** Математическая модель фильтруемой изоляции высокотемпературной печи при направленной подаче охладителя / Э. Д. Сергиевский, А. Н. Крылов // Вестник МЭИ. — 2006. — № 5. — С. 115 – 120.
 10. **Глазов, В. С.** Температурное поле пористой пластины при лучистом нагреве и фильтрации теплоносителя / В. С. Глазов, О. Б. Колибаба, А. В. Жеглов, С. Е. Петрова // Тезисы докл. Международной научно-технич. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» XIII Бенардосовские чтения. — Иваново: ИГЭУ, 2006. — С. 62 – 65.
 11. **Глазов, В. С.** Совершенствование методов расчета, математического моделирования и конструкций теплотехнологических установок при нагреве пористых тел излучением: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Минск, 1990. — 18 с.
 12. **Глазов, В. С.** Определение теплофизических свойств пористых полупрозрачных тел / В. С. Глазов, С. А. Абдулкеримов, М. С. Пурдин, К. Б. Алиев // Сборник материалов Девятой Международной теплофизической школы «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий», 6 – 11 октября 2014 г., Таджикистан. — Душанбе: ООО «Ходжи Хасан», 2014. — 839 с.
 13. **Глазов, В. С.** Определение теплофизических свойств полупрозрачной пористой пластины при нагреве её излучением / В. С. Глазов, М. В. Горелов, М. Ю. Юркина // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе [Текст]: Сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений (22 – 23 сентября 2015 года), РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева. — Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015. — С. 466 – 469.
 14. **Попов, И. А.** Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования при вынужденном и свободно конвективном движении теплоносителя: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Казань: КГТУ, 2008. — 40 с.
 15. **Власенко, А. С.** Увеличение эффективности теплообменников посредством интенсификации теплообмена на поверхностях со сферическими углублениями: Автореф. дис. канд. техн. наук. — М.: МЭИ, 2011. — 20 с.
 16. **Арбатский, А. А.** Повышение эффективности пластинчатых теплоутилизаторов посредством интенсификации теплообмена на поверхностях с овальными лунками: Автореф. дис. канд. техн. наук. — М.: МЭИ, 2016. — 20 с.
 17. **Ройзен, Л. И.** Тепловой расчет ребренных поверхностей / Л. И. Ройзен, И. Н. Дулькин: под ред. В. Г. Фастовского. — М.: Энергия, 1977. — 256 с.
 18. **Керн, Д.** Развитые поверхности теплообмена / Д. Керн, А. Краус. Пер. с англ. — М.: Энергия, 1977. — 464 с.
 19. **Глазов, В. С.** Эффективность теплообменной поверхности, профилированной прямоугольными ребрами / В. С. Глазов, А. А. Кобзева // Промышленная энергетика. — 2023. — № 4. — С. 21 – 29. DOI: 10.34831/EP2023.20.96.003.
 20. **Попов, С. К.** Термохимическая рекуперация в высокотемпературной теплотехнологии: Монография: / С. К. Попов. — М.: Издательство МЭИ, 2018. — 103 с.
 21. **Гельперин, Н. И.** Основные процессы и аппараты химической технологии / Н. И. Гельперин. — М.: Химия, 1981. — 812 с.
 22. **Егоров, К. С.** Повышение эффективности теплообменных аппаратов газотурбинных установок замкнутого цикла: Автореф. дис. канд. техн. наук. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — 20 с.

References

1. **Vu Van Ch'en** *Ispol'zovanie trub Fil'da v apparatakh sistemy kompleksnoi utilizatsii teplovykh otkhodov vysokotemperaturnykh ustanovok* (Use of Field tubes in devices of the system of complex utilization of thermal waste of high-temperature installations), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Moscow, MPEI, 2012, p. 20.
2. **Goryunova I. Yu.** *Povyshenie effektivnosti vannykh steklovarennykh pechei na baze primeneniya fil'truemoi izolyatsii rabochego prostranstva* (Improving the efficiency of glass melting bath furnaces using filtered insulation of the working space), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Moscow, MPEI, 1988, p. 20.
3. **Govorukhin L. N., Kosenkov V. I., Sergievskii E. D.** *Futerovka-ograzhdenie metallurgicheskoi pechi: a.s. 1354016 SSSR* (Lining-fencing of a metallurgical furnace: a.s. 1354016 USSR), No. 4170832/31-02, claimed 31.12.86, publ. 23.09.88, Bul. No. 35, p. 2.
4. **Pereletov I. I., Mitrokhin Yu. S.** *Energetika. Izvestiya VUZov i energeticheskikh ob'edinenii SNG* (ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations), 1989, No. 12, pp. 82 – 86.
5. **Alimgazin A. Sh., Akishev A. X., Martynov Yu. A., Kharlamov S. N., Motulevich V. P., Sergievskii E. D.** *Teploenergetika* (Teploenergetika), 1988, No. 5, pp. 69 – 71.
6. **Khoang Kh. Kh.** *Issledovanie slozhnogo teploobmena v trubakh Fil'da i ikh ispol'zovanie v energosberegayushchei skheme steklovarennoi ustanovki* (Study of complex heat transfer in Field tubes and their use in energy-saving scheme of glass melting), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Moscow, MPEI, 2010, p. 20.
7. **Vasil'eva N. I.** *Modelirovanie teplomassoobmennykh protsessov v kanalakh teplotekhnologicheskikh promyshlennykh ustanovok s uchetom vliyaniya vneshnikh faktorov* (Modeling of heat and mass transfer processes in channels of industrial heat-engineering installations taking into account the influence of external factors), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Moscow, MPEI, 2005, p. 20.

8. **Vu Si Ki.** *Povyshenie effektivnosti vysokotemperaturnoi ustanovki posredstvom vikhrevykh intensivatorov teploobmena v kanalakh naruzhnogo ograzhdeniya* (Improving the efficiency of a high-temperature installation by means of vortex heat exchange intensifiers in the outer enclosure channels), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Moscow, MPEI, 2021, p. 20.
9. **Sergievsii E. D., Krylov A. N.** *Vestnik MEI* (MPEI Vestnik), 2006, No. 5, pp. 115 – 120.
10. **Glazov V. S., Kolibaba O. B., Zheglov A. V., Petrova S. E.** *Tezisy dokl. Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnich. Konf. «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii» XIII Benardoskie chteniya* (Abstracts of the report of the International scientific and technical conference «State and prospects of development of electrotechnology» XIII Benardos readings), Ivanovo, ISPU, 2006, pp. 62 – 65.
11. **Glazov V. S.** *Sovershenstvovanie metodov rascheta, matematicheskogo modelirovaniya i konstruksii teplotekhnologicheskikh ustanovok pri nagreve poristykh tel izlucheniem* (Improving the methods of calculation, mathematical modeling and design of heat-engineering installations for heating porous bodies by radiation), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Minsk, 1990, p. 18.
12. **Glazov V. S., Abdulkerimov S. A., Purdin M. S., Aliev K. B.** *Sbornik materialov Devyatoi Mezhdunarodnoi teplofizicheskoi shkoly «Teplofizicheskie issledovaniya i izmereniya pri kontrole kachestva veshchestv, materialov i izdelii»* (Collection of materials of the Ninth International Thermophysical School «Thermophysical Research and Measurements in Quality Control of Substances, Materials and Products»), Tajikistan, Dushanbe, 2014, p. 839.
13. **Glazov V. S., Abdulkerimov S. A., Purdin M. S., Aliev K. B.** *Sbornik materialov Devyatoi Mezhdunarodnoi teplofizicheskoi shkoly «Teplofizicheskie issledovaniya i izmereniya pri kontrole kachestva veshchestv, materialov i izdelii»* (Collection of scientific articles of the First International Lykovo Scientific Readings), Russian State Agrarian University, Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2015, pp. 466 – 469, Kursk, ZAO «University Book».
14. **Popov I. A.** *Teplogidravlicheskaya effektivnost' perspektivnykh sposobov intensivatsii teplootdachi v kanalakh teploobmennogo oborudovaniya pri vyunuzhennom i svobodno konvektivnom dvizhenii teplonositelya* (Thermal-hydraulic efficiency of promising methods of heat transfer intensification in heat-exchange equipment channels with forced and free convective movement of the coolant), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Kazan, KNRTU, 2008, p. 40.
15. **Vlasenko A. S.** *Uvelichenie effektivnosti teploobmennikov posredstvom intensivatsii teploobmena na poverkhnostyakh so sfericheskimi uglubleniyami* (Increasing the efficiency of heat exchangers by intensifying heat exchange on surfaces with spherical depressions), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Moscow, MPEI, 2011, p. 20.
16. **Arbatskii A. A.** *Povyshenie effektivnosti plastinchhatykh teploutilizatorov posredstvom intensivatsii teploobmena na poverkhnostyakh s oval'nymi lunkami* (Increasing the efficiency of plate heat exchangers by intensifying heat exchange on surfaces with oval dimples), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Moscow, MPEI, 2016, p. 20.
17. **Roizen, L. I., Dul'kin I. N.** *Teplovoi raschet orebrennykh poverkhnostei* (Thermal calculation of ribbed surfaces), Moscow, Energy, 1977, 256 p.
18. **Kern D., Kraus A.** *Razvitye poverkhnosti teploobmena* (Developed heat exchange surfaces), translated from English, Moscow, Energy, 1977, 464 p.
19. **Glazov V. S., Kobzeva A. A.** *Promyshlennaya energetika* (Industrial power engineering), 2023, No. 4, pp. 21 – 29, DOI: 10.34831/EP.2023.20.96.003.
20. **Popov S. K.** *Termokhimicheskaya rekuperatsiya v vysokotemperaturnoi teplotekhnologii* (Thermochemical recovery in high-temperature heat technology), Moscow, Publ. MPEI, 2018, 103 p.
21. **Gel'perin N. I.** *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii* (Basic processes and apparatuses of chemical technology), Moscow, Chemistry, 1981, 812 p.
22. **Egorov K. S.** *Povyshenie effektivnosti teploobmennyykh apparatov gazoturbinnyykh ustanovok zamknutogo tsikla* (Improving the efficiency of heat exchangers of closed-cycle gas turbine units), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Moscow, BMSTU, 2007, p. 20.

GlazovVS@mpei.ru

Дата поступления 4.04.2025

Дата принятия к публикации 25.04.2025

Directions for improving the efficiency of high-temperature heat engineering installations

Glazov V. S.

An overview of the works devoted to the methods used in the methodology of increasing the energy efficiency of fuel high-temperature heat technology installations powered by natural gas is presented. The limitations of the methods used are noted and solutions that can overcome the identified limitations are indicated.

Keywords: efficiency, thermochemical regeneration, heat exchange intensifiers, heat exchange optimization, filtered thermal insulation, thermophysical properties, Field pipe, thermal waste disposal, glass-making plant, thermal scheme.

DOI: 10.71759/wmx1-rj19

Специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника;

2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Исследование зависимости КПД роторного теплового утилизатора вытяжного воздуха систем вентиляции от скорости его вращения

Арбатский А. А., канд. техн. наук, Мечник Д. А., аспирант, Горелов М. В., канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Анкудинов А. С., ведущий инженер-исследователь

ООО «Научно-исследовательский институт «Энергоэффективных технологий микроклимата»
(НИИ «ЭТМ»), Рязань

В процессе разработки вентиляционного и климатического оборудования наблюдается существенный дефицит опытных данных, применяемых для расчета тепловых утилизаторов. При этом используются опытные данные или расчетные методы, часто не соответствующие характеристикам работы теплового утилизатора в составе оборудования, так как при конструировании, стремясь к максимальной компактности оборудования, не всегда выполняются условия распределения воздушного потока по сечению теплового утилизатора, которые соблюдаются при их испытаниях и подразумеваются в расчетных методах. Проведены исследование зависимости КПД роторного теплового утилизатора системы вентиляции в зависимости от частоты вращения и сравнение с существующими данными.

Ключевые слова: экспериментальные исследования роторных регенераторов, роторные тепловые утилизаторы, системы вентиляции и кондиционирования.

В Российской Федерации за период с 2000 по 2023 гг. наблюдался отчетливый рост строительства жилых зданий как многоквартирных, так индивидуальных. Динамика ввода в действие жилых домов в расчете на 1000 чел. населения представлена на рис. 1 [1]. Строительство жилых зданий влечет за собой развитие инфраструктуры и, как следствие, строительство общественных, административных и социальных объектов. По данным Минстроя России, в 2023 г. общая площадь недвижимости, введенной в эксплуатацию на

территории России, составила 175 млн м², более 20 % из них приходилась на нежилые здания [2].

Здания любого назначения являются потребителями тепловой энергии, которая идет на нужды отопления, горячего водоснабжения (ГВС), вентиляции и прочие. Динамика потребления энергии на нужды жилищно-коммунального сектора представлена на рис. 2.

Строительство новых, более энергоэффективных зданий и повышение теплозащиты существующих, а также рост использования



Рис. 1. Динамика ввода в действие жилых домов за период 2000 – 2023 гг., 1 м² на 1000 чел. населения

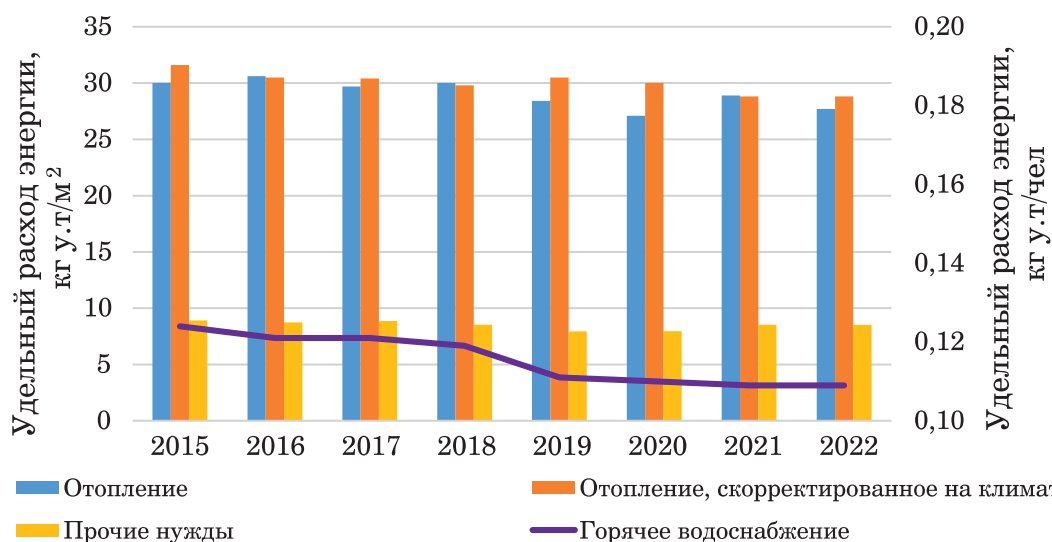


Рис. 2. Динамика удельных расходов энергии на производство отдельных видов продукции в жилищно-коммунальном секторе в 2015 – 2022 гг.

энергоэффективных систем ГВС и бытовых приборов позволили в 2022 г. снизить потребление энергии в жилищном секторе за счет технологического фактора на 1,3 млн т у.т. Без коррекции на климат удельные расходы энергии на отопление в 2022 г. оказались самыми низкими с 2015 г. При коррекции удельного расхода на климат и уровень благоустройства соответствующие расходы остались на уровне 2021 г., который также является самым низким показателем с 2015 г. (см. рис. 2). Тенденция снижения удельного расхода энергии на нужды ГВС сохранилась не только за счет продолжения замены водоразборного оборудования и повышения оснащенности приборами учета жилых зданий, но и за счет отнесения потребления к большей площади, по мере роста обеспеченности жилой площадью. После повышения удельного расхода на прочие нужды населения в 2021 г. потребление энергии несколько сократилось в 2022 г. [2].

В жилых и общественных зданиях при проектировании систем жизнеобеспечения реализуются системы приточной и вытяжной вентиляции. В общественных зданиях системы вентиляции реализованы с применением приточно-вытяжных установок, в состав которых входят вентиляторы. Вентиляция жилых зданий является естественной с организованным или неорганизованным притоком воздуха. Однако с ростом строительства жилых зданий и увеличением доли зданий комфорт-, бизнес- и премиум-классов приточно-вытяжные установки монтируются на этапе строительства. Также в последнее время наблюдается повы-

шенный спрос на устройство приточно-вытяжной вентиляции с применением индивидуальных современных энергоэффективных установок малой производительности в существующих квартирах зданий различного класса.

Современная приточно-вытяжная установка вентиляции способна обрабатывать воздух в большом диапазоне производительности по воздуху (150 – 120 000 м³/ч). Такие объемы перемещаемого воздуха, особенно в холодный период, требуют подогрева до температуры внутреннего воздуха. Средняя разница температур нагрева воздуха от наружного до внутреннего — не менее 20 °С. Большие объемы перемещаемого воздуха и необходимость его нагрева требуют значительных затрат тепловой энергии.

Для снижения затрат тепловой энергии сегодня повсеместно используются установки с различными вариантами рекуперации теплоты. Это позволяет снизить эксплуатационные затраты и требуемую нагрузку тепловой энергоустановки здания при запросе технических условий на подключение ее к системам централизованного теплоснабжения. Анализ продаж оборудования систем вентиляции и кондиционирования воздуха за период 2012 – 2020 гг. позволяет сделать вывод о том, что 96 % всех приточно-вытяжных установок были оснащены рекуперацией теплоты [3, 4].

Наиболее эффективным аппаратом для утилизации теплоты вытяжного воздуха является роторный регенератор теплоты, в спецификациях и каталогах приточно-вытяжных установок его чаще называют рекуператором.

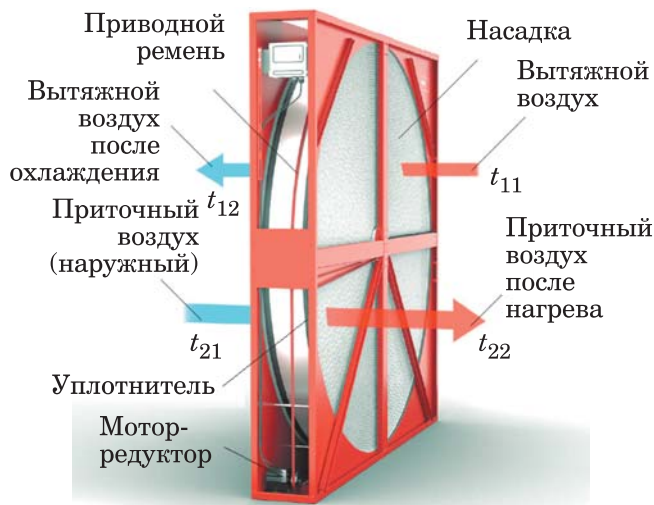


Рис. 3. Принцип действия роторного регенератора теплоты:

t_{21} — температура приточного (наружного) воздуха, °С; t_{22} — температура приточного воздуха после нагрева в роторном регенераторе, °С; t_{11} — температура вытяжного воздуха, °С; t_{12} — температура вытяжного воздуха после охлаждения в роторном регенераторе, °С

В рамках настоящей статьи авторы используют классический термин *роторный регенератор*, который характерен для теплоэнергетики. Схематичное изображение роторного регенератора и принцип его действия представлены на рис. 3.

Независимо от производителя конструкция роторных регенераторов практически одинаковая. В качестве аккумулирующей насадки используется алюминиевая фольга толщиной в среднем 0,6 мм и высотой ребра в среднем 1,3 – 1,7 мм, оребрение — треугольное. Отечественная промышленность выпускает роторные регенераторы со стандартной глубиной 200 мм и диаметром до 2700 мм. Аккумулирующая насадка через ременной привод соединена с мотор-редуктором, который обеспечивает ее вращение с частотой до 60 об/мин. Вращение насадки позволяет попеременно находиться ей в воздухе с разной температурой, т.е. в один момент времени насадка нагревается, в другой — остывает. Этот процесс представлен также на рис. 3.

Настоящая статья посвящена экспериментальному определению эффективности роторного регенератора теплоты приточно-вытяжной установки. Для достижения поставленной цели были поставлены задачи, которые в последующем успешно решены:

выполнен анализ доступных литературных источников, посвященных расчету эффективности (КПД) роторных регенераторов приточно-вытяжных установок систем вентиляции;

проведен натурный эксперимент в лаборатории НИИ «ЭТМ» роторного регенератора компактной приточно-вытяжной установки;

обработаны результаты натурного эксперимента;

определена зависимость эффективности роторного регенератора от частоты вращения ротора для компактной приточно-вытяжной установки и проведено сравнение подхода к ее определению с другими авторами.

В научной периодике все чаще уделяется внимание утилизации теплоты вытяжного вентиляционного воздуха с применением роторного регенератора. Большинство статей посвящены теоретическим вопросам определения эффективности использования роторного регенератора [5, 6] и численному моделированию процессов переноса теплоты в насадке [7]. Интерес представляет также и руководство по проектированию роторных регенераторов теплоты для систем вентиляции одного из мировых лидеров по производству таких теплообменников [8], которое содержит результаты натуральных и численных экспериментов. Основной характеристикой роторных регенераторов является КПД, иногда называемый температурной (термической) эффективностью. Расчет КПД роторного регенератора (в настоящей статье используется термин *температурный КПД*) выполняют по формуле

$$\eta_t = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}. \quad (1)$$

Гигрометрический коэффициент эффективности — еще один критерий работы роторного регенератора теплоты, который находят из выражения:

$$\eta_x = \frac{x_{22} - x_{21}}{x_{11} - x_{21}}, \quad (2)$$

где x_{22} — влагосодержание (т.е. масса водяного пара во влажном воздухе, приходящаяся на 1 кг массы сухой его части) приточного воздуха после нагрева в роторном регенераторе, кг/кг с.в.; x_{21} — влагосодержание приточного (наружного) воздуха, °С; x_{11} — влагосодержание вытяжного воздуха, °С.

Натурный эксперимент для роторного регенератора теплоты в составе компактной при-

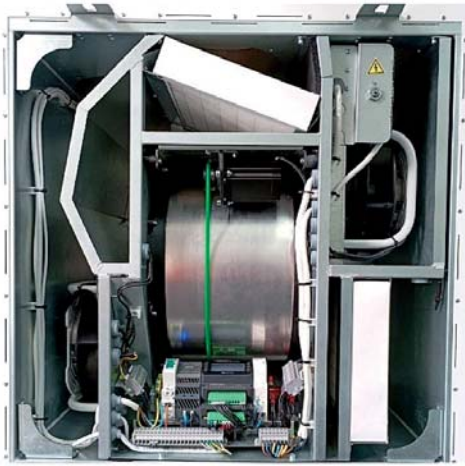


Рис. 4. Установка компактной приточно-вытяжной вентиляции с утилизацией теплоты

точно-вытяжной установки выполнен в условиях измерительной лаборатории НИИ

«ЭТМ». Фотография установки представлена на рис. 4.

Принципиальная схема испытаний теплообменного оборудования с указанием точек изменения параметров (температура, влажность и др.) представлена на рис. 5.

В процессе проведения эксперимента часть оборудования была отключена, так как в составе компактной приточно-вытяжной установки оно входит в базовую комплектацию (вентиляторы, электрический подогреватель приточного воздуха, система регулирования).

Стенд, принципиальная схема которого представлена на рис. 5, может быть использован для испытаний теплообменного оборудования с теплоносителями воздух/вода, воздух/воздух; приточных, вытяжных и приточно-вытяжных установок в соответствии с требованиями [9, 10]. На стенде при испытаниях приточно-вытяжной установки возможно

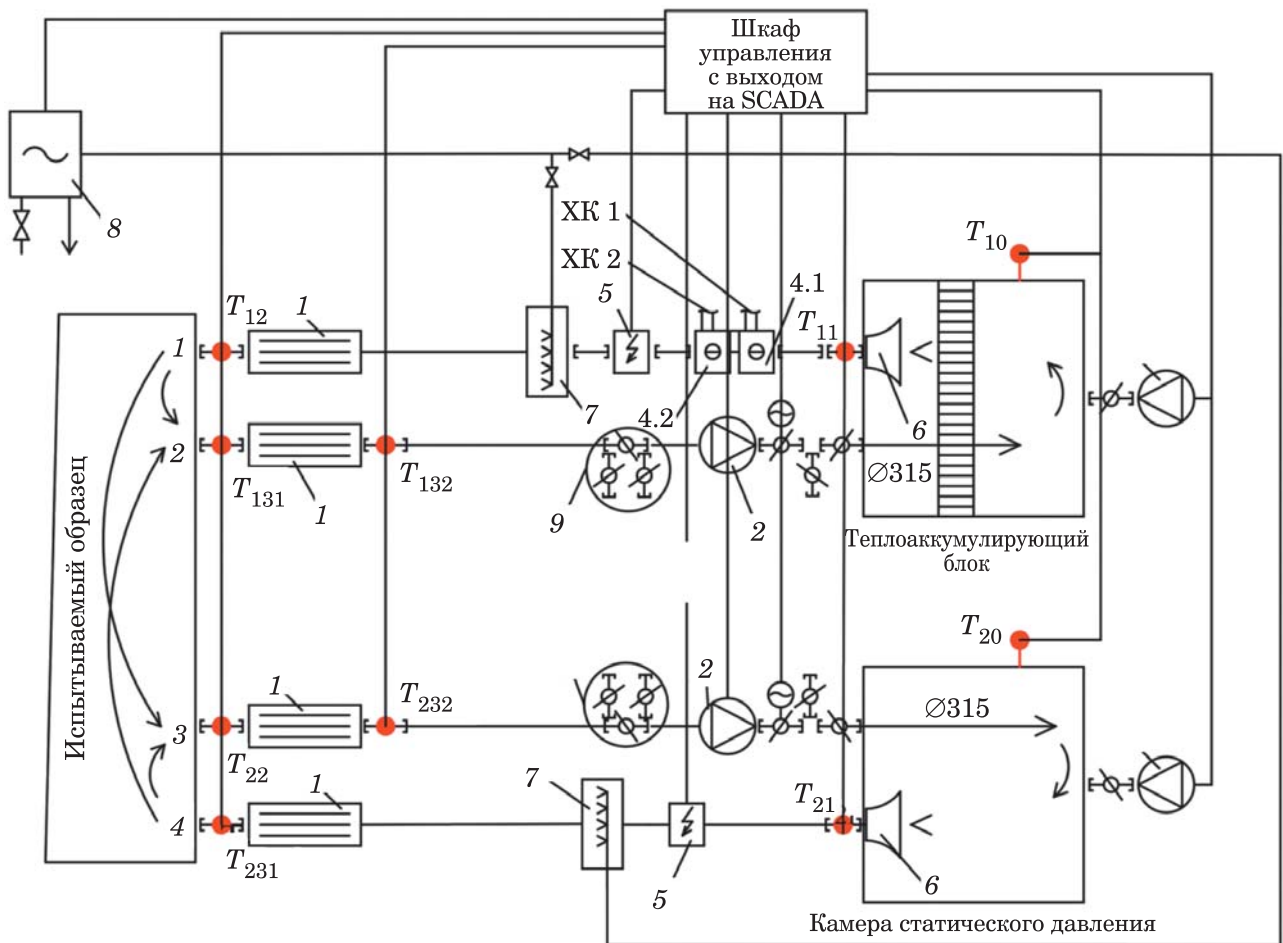


Рис. 5. Принципиальная схема стенда испытаний теплообменного оборудования:

1 — выравниватели потока; 2 — вспомогательные вентиляторы; 3 — вентиляторы имитации внешнего напора; 4 — охладители (4.1 — охладитель 1-й ступени (до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$), 4.2 — охладитель 2-й ступени (до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$)); 5 — электрический нагреватель; 6 — измерительный коллектор; 7 — парораспределитель; 8 — парувлажнитель (10 кг/ч); 9 — группы байпасных клапанов

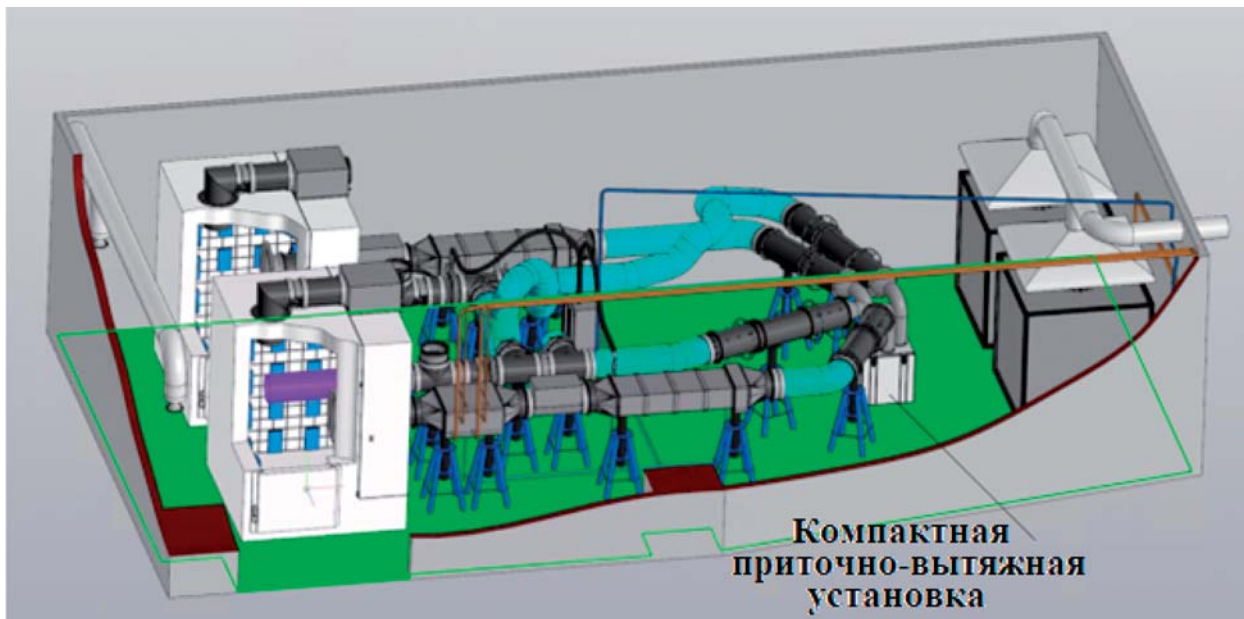


Рис. 6. 3d модель стенда с указанием участков, задействованных в натурном эксперименте

определить в реальных режимах работы следующие характеристики:

- герметичность корпуса;
- тепловую защиту корпуса;
- отработку автоматики при изменении ветровой нагрузки;
- расход воздуха и располагаемое давление (в том числе строить расходно-напорную характеристику установки);
- совокупное аэродинамическое сопротивление установки;
- коэффициенты перетока воздуха между приточными и вытяжными трактами;
- энергетическую эффективность.

Также возможно построение зависимостей, позволяющих создавать математические модели управления вентиляционными установками.

Трехмерная модель стенда испытаний теплообменного оборудования с подключенной установкой представлена на рис. 6.

При проведении экспериментальных исследований создавались условия работы приточно-вытяжной установки в холодный период года, т.е. приточный (наружный) воздух имел температуру $t_{21} < t_{11}$. Это условие обеспечивалось применением охладителя 1-й ступени (см. рис. 5). Контроллеры фиксировали 39 различных параметров на измерительных участках с шагом 10 с. Такая фиксация выполнялась в течение периода, превышавшего 6 ч, что отражено требованиями п. 5.5 [9] при экспериментальном определении термического коэф-

фициента эффективности. Блок управления приточно-вытяжной установкой позволяет менять частоту вращения роторного регенератора при эксплуатации. Эксперимент проводился при частоте вращения от 1 до 8 об/мин.

На рис. 7 и 8 представлены результаты измерений температуры приточного воздуха в трех точках сечения до приточно-вытяжной установки и после нее соответственно, на основании которых можно судить о стабилизированных параметрах воздушного потока. Данные на рис. 7 и 8 представлены для частоты вращения роторного регенератора 1 об/мин.

Каждый массив данных, соответствующий конкретной частоте вращения роторного регенератора, был обработан с использованием критерия Граббса [11]. Полученные значения легли в основу расчета температурного КПД. В таблицу сведены результаты обработки массива данных.

На основании данных таблицы определены значения температурного КПД в зависимости от частоты вращения ротора с поправкой на различие расходов приточного и вытяжного воздуха. Обновленная формула (1) приобрела вид:

$$\eta_t^* = \frac{L_{\text{п}}(t_{22} - t_{21})}{L_{\text{в}}(t_{11} - t_{21})}, \quad (3)$$

где $L_{\text{п}}$ — расход приточного воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$; $L_{\text{в}}$ — расход вытяжного воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$.

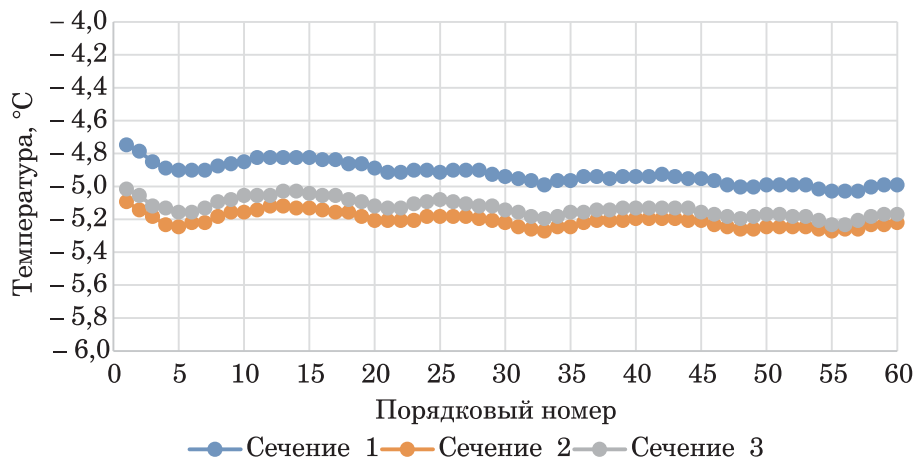


Рис. 7. Изменение температуры приточного (наружного) воздуха во времени в точках сечения канала до приточно-вытяжной установки

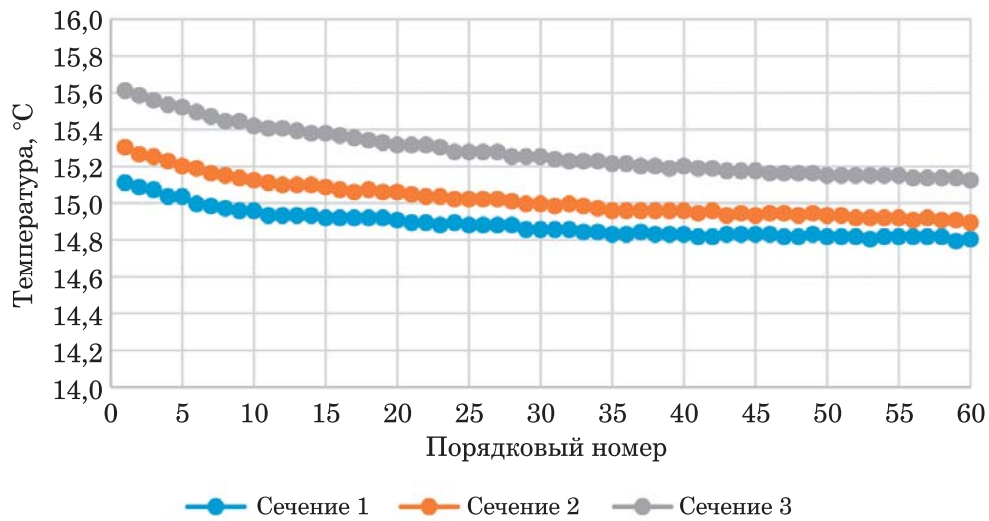


Рис. 8. Изменение температуры приточного воздуха во времени в точках сечения канала после приточно-вытяжной установки

Результаты обработки данных эксперимента

Частота вращения n , об/мин	t_{21} , °C	Относительная влажность φ_{21} , %	t_{22} , °C	Относительная влажность φ_{22} , %	t_{12} , °C	Относительная влажность φ_{12} , %	Расход приточного воздуха $L_{\text{п}}$, м ³ /ч	Расход вытяжного воздуха $L_{\text{в}}$, м ³ /ч
1	-3,1	33,2	15,3	10,3	23	14,3	331	350,5
2	-3	30,7	18,5	8,9	23	14,7	325,4	355,8
3	-3	30,4	18,8	8,5	22,6	14,3	324,8	357
4	-3,1	28,5	18,9	7,9	22,4	13,3	324,9	358
5	-3,1	15,3	20,2	4,6	23,9	12,9	322	355,7
7	-3,1	18,1	20,2	4,4	23,8	11,8	322,1	356,7
8	-3	19,9	20,2	4,7	23,9	11,8	322	356,7

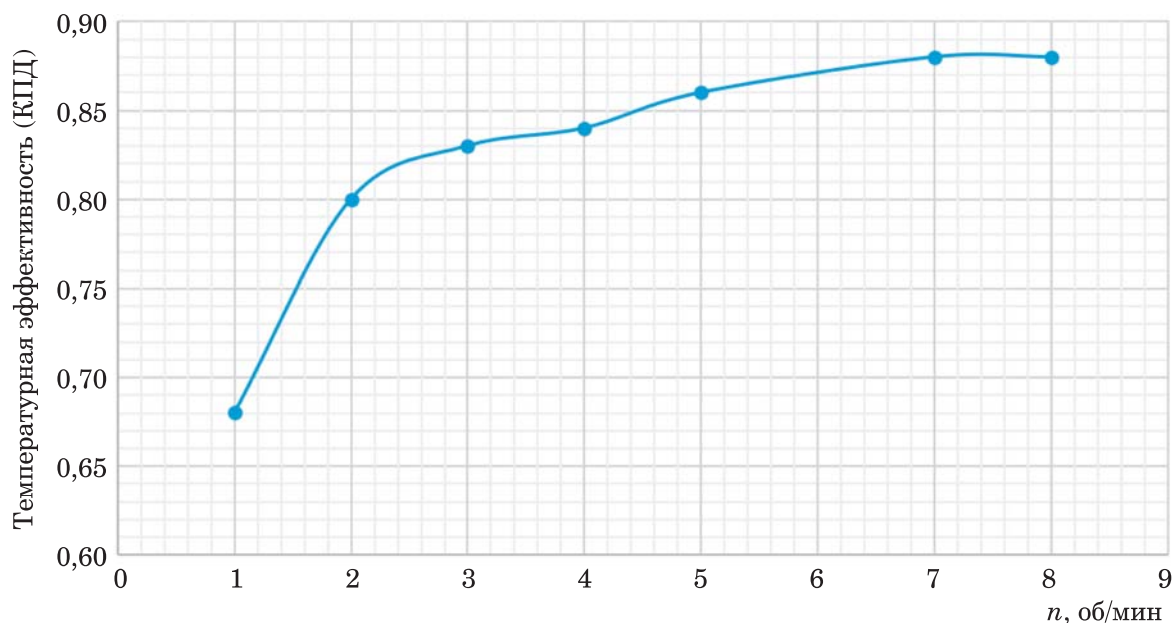


Рис. 9. Изменение температурного КПД роторного регенератора в зависимости от частоты вращения ротора

Зависимость температурного КПД роторного регенератора от частоты вращения представлена на рис. 9.

Увеличение частоты вращения роторного регенератора приводит к росту температурного КПД, но при достижении 8 об/мин этот рост прекращается. При частоте вращения выше 8 об/мин $\eta_t^* = 0,87$.

В [8] представлен график для подбора роторного регенератора теплоты практически любой конструкции, который позволяет определить температурный КПД с учетом его частоты вращения. Кривая 1 на рис. 10 — это кор-

ректирующий фактор при расчете температурного КПД. Из графика видно, что температурный КПД не изменяется при частоте вращения больше 12 об/мин. Расхождение данных с результатами авторов предположительно объясняется тем, что рассмотрен роторный регенератор в «чистом» виде, т.е. без влияния корпуса приточно-вытяжной установки. По данным [8] при частоте вращения ротора от 4 об/мин корректирующий фактор (коэффициент корректировки) достигает значения 0,95 и продолжает расти. Это хорошо согласуется (различие не превышает 5 %) с результатами экспериментальных исследований авторов.

Однако уравнение (1) не отражает энергетический смысл эффективности работы установки утилизации теплоты вытяжного воздуха, так как показывает только теплосодержание сухой его части, а воздух в системах вентиляции является влажным. В этой связи предлагается использовать энтальпийный КПД роторного регенератора, который позволяет оценить полное теплосодержание вытяжного воздуха, являющегося влажным. Для определения энтальпийного КПД роторного регенератора предложена формула:

$$\eta_h^* = \frac{L_{\text{п}}(h_{22} - h_{21})}{L_{\text{в}}(h_{11} - h_{21})}, \quad (4)$$

где $L_{\text{п}}$ — расход приточного воздуха, м³/ч; $L_{\text{в}}$ — расход вытяжного воздуха, м³/ч.

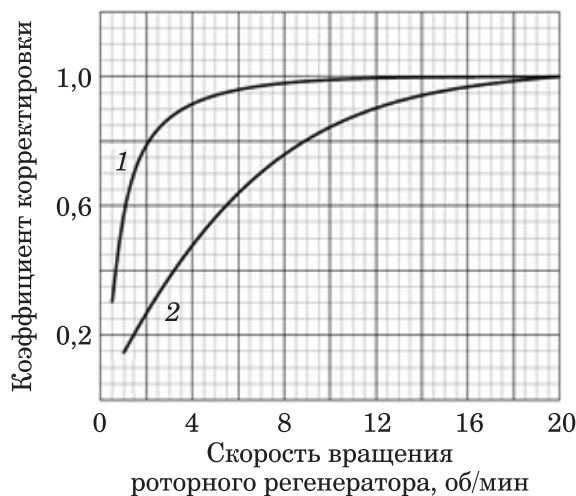


Рис. 10. Влияние частоты вращения роторного регенератора на коэффициент корректировки [8]:

1 — температурный КПД; 2 — гигрометрический коэффициент эффективности

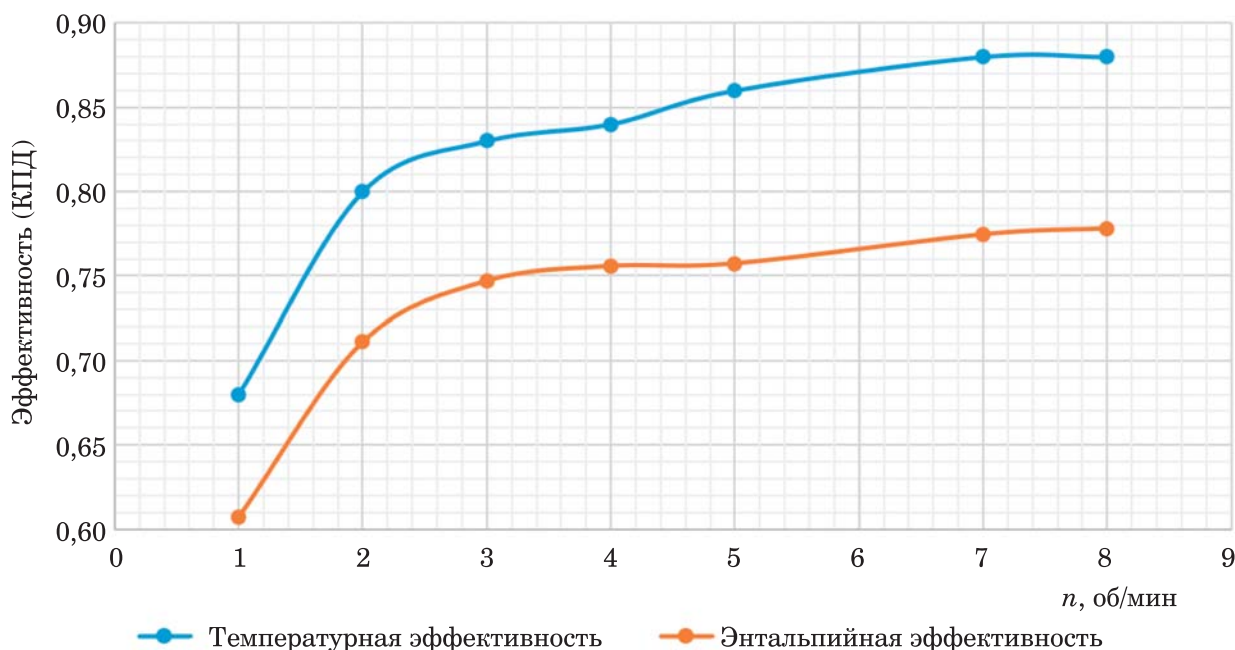


Рис. 11. Зависимость КПД от частоты вращения роторного регенератора

Зависимость энтальпийного КПД от частоты вращения роторного регенератора представлена в сравнении с температурным КПД на рис. 11.

На рис. 11 видно, что графики зависимости температурного и энтальпийного КПД от частоты вращения роторного регенератора схожи по характеру, стабилизация наступает при одинаковой частоте вращения, несмотря на то, что явно имеет место погрешность определения энтальпийного КПД, более существенная, чем температурного (разброс данных вызван дополнительной погрешностью определения влагосодержания воздуха при расчете энтальпийного КПД).

Выводы

1. Получен массив экспериментальных данных работы роторного регенератора в составе приточно-вытяжной установки при различной его частоте вращения.

2. Определено влияние частоты вращения роторного регенератора на КПД на основании экспериментальных данных, выполнен расчет температурного КПД при разной частоте вращения роторного регенератора.

3. Проведено сравнение полученных результатов расчета температурного КПД с рекомендациями по подбору роторных утилизаторов теплоты ведущего мирового производителя, указаны причины расхождения

полученных результатов и результатов других авторов.

4. Определен энтальпийный КПД роторного регенератора, который позволяет учитывать полностью теплосодержание воздуха, проходящего через теплообменник. Выполнено сравнение значений температурного и энтальпийного КПД при одинаковых условиях работы установки.

Список литературы

1. **О жилищном строительстве в Российской Федерации** [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики [сайт]. [2025] / URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/jil_stroi_2023.pdf (дата обращения 13.03.2025)
2. **Файзуллин Ирек: В России в 2023 году введено 35,7 млн кв. м нежилых зданий** [Электронный ресурс] // Минстрой РФ: [сайт]. [2025] / URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/irek-fayzullin-v-rossii-v-2023-godu-vvedeno-35-7-mln-kv-m-nezhilykh-zdaniy/> (дата обращения 13.03.2025)
3. **Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышения энергетической эффективности в 2022 году** [Электронный ресурс] // Минэкономразвития РФ [сайт]. [2025] / URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/b2ec92f00344707af95c8d44a6abbde8/Energy_efficiency_2023.pdf (дата обращения 13.03.2025)
4. **Андронов, Ф. И. Роторные регенераторы для систем вентиляции и кондиционирования: Сделано в России** / Ф. И. Андронов // Сантехника, отопление, кондиционирование. — 2022. — № 7. — С. 52 – 54.

5. Самарин, О. Д. Температурная эффективность пластинчатых и роторных теплоутилизаторов при различных расходах воздуха / О. Д. Самарин // Сантехника, отопление, кондиционирование, 2014. № 1. С. 118 – 119.
6. Драпалюк, Н. А. Об эффективности регенеративных вращающихся утилизаторов теплоты для систем вентиляции / Н. А. Драпалюк, А. Гурбангульев, Т. В. Шукина, Д. А. Драпалюк // Сантехника, отопление, кондиционирование. — 2020. — № 8. — С. 48 – 51.
7. Tytus Tulwin. Modelling of a large rotary heat exchanger / Tytus Tulwin // Applied Computer Science. — 2017. — Vol. 13, No. 1. — Pp. 20 – 28.
8. Hoval energy recovery. Rotary heat exchangers: Design handbook, 2024. P. 66.
9. ГОСТ Р ЕН 308–2011. Теплообменники. Методы испытаний для определения критериев мощности установок регенерации тепла из смеси воздух / воздух и воздух / отработанный газ. — М.: Стандартинформ, 2012.
10. ГОСТ 26548–85. Воздухонагреватели. Методы испытаний. — М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985.
11. ГОСТ Р ИСО 5479–2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения. — М.: Госстандарт России, 2002.
4. Andronov F. I. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie* (Plumbing, heating, air conditioning), 2022, No. 7, pp. 52 – 54.
5. Samarina O. D. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie* (Plumbing, heating, air conditioning), 2014, No. 1, pp. 118 – 119.
6. Drapalyuk N. A., Gurbangulyev A., Shchukina T. V., Drapalyuk D. A. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie* (Plumbing, heating, air conditioning), 2020, No. 8, pp. 48 – 51.
7. Tulwin T. Modelling of a large rotary heat exchanger, Applied Computer Science, 2017, Vol. 13, No. 1, pp. 20 – 28.
8. Hoval energy recovery. Rotary heat exchangers: Design handbook, 2024, p. 66.
9. GOST R EN 308–2011. *Teploobmenniki. Metody ispytaniy dlya opredeleniya kriteriev moshchnosti ustanovok regeneratsii tepla iz smesi vozdukh/vozdukh i vozdukh/otrabotanniy gaz* (State Standard 308–2011. Heat exchangers. Test methods for determining the power criteria of air/air and air/exhaust gas mixture heat recovery devices), Moscow, Standartinform, 2012.
10. GOST 26548–85. *Vozdukhonagrevateli. Metody ispytaniy* (State Standard 26548–85. Air heaters. Methods of tests), Moscow, State Committee of the USSR for Standards, 1985.
11. GOST R ISO 5479–2002. *Statisticheskie metody. Proverka otkloneniya raspredeleniya veroyatnostei ot normal'nogo raspredeleniya* (State Standard 5479–2002. Statistical methods. Tests for departure of the probability distribution from the normal distribution), Moscow, State Standard of Russia, 2002.

References

1. O zhilishchnom stroitel'stve v Rossiiskoi Federatsii (On housing construction in the Russian Federation), [Electronic resource]. — URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/jil_stroi_2023.pdf (accessed:13.03.2025).
2. Irek Faizullin: V Rossii v 2023 godu vvedeno 35,7 mln kv. m nezhilykh zdaniy (In Russia in 2023, 35.7 million square meters of non-residential buildings were commissioned), [Electronic resource]. — URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/irek-fayzullin-v-rossii-v-2023-godu-vvedeno-35-7-mln-kv-m-nezhilykh-zdaniy/> (accessed: 13.03.2025).
3. Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii energosbezrezheniya i povysheniya energeticheskoi effektivnosti v Rossiiskoi Federatsii v 2022 godu (State report on the state of energy saving and energy efficiency improvement in the Russian Federation in 2022), [Electronic resource]. — URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/b2ec92f00344707af95c8d44a6abbde8/Energy_efficiency_2023.pdf (accessed:13.03.2025).

ArbatskyAnA@mpei.ru

Дата поступления 27.03.2025

Дата принятия к публикации 25.04.2025

Dependency study of ventilation systems' exhaust air rotary heat exchanger efficiency on its rotation speed

Arbatskiy A. A., Mechnik D. A., Gorelov M. V., Ankudinov A. S.

At the moment, when developing ventilation and climate control equipment, there is a significant shortage of experimental data used to calculate heat exchangers. During development, experimental data (for example [8]) or calculation methods are used, which often do not correspond to the operating characteristics of the heat exchanger as part of the equipment, since during design, due to the desire for maximum compactness of the equipment, the conditions of air flow distribution along the cross-section of the heat exchanger are often not observed, which are observed during their tests and implied in the design methods. In this paper, a study was conducted on the dependence of the efficiency of a rotary heat exchanger of a ventilation system depending on rotary speed as part of a supply and exhaust ventilation system.

Keywords: experimental studies of rotary regenerators, rotary heat recovery units, ventilation and air conditioning systems.

DOI: 10.71759/cc7п-0м44

Специальность 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность

Анализ характеристик и инновационных решений активных зон ядерных реакторов малой мощности

Четвериков А. Е., канд. техн. наук, Солдатов И. М., ст. преподаватель
Хвостова М. С., канд. геогр. наук
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Солдатов А. И.
Московский центр ВАО АЭС

Рассмотрены вопросы развития инновационных проектов атомных станций малой мощности. Систематизированы и проанализированы предложенные разными странами технические решения и характеристики, касающиеся активной зоны реакторов малой мощности, такие как тип реактора, тепловая мощность, тип циркуляции теплоносителя в первом контуре, тип, обогащение и глубина выгорания ядерного топлива, продолжительность топливного цикла, управление реактивностью и статус проекта. Отмечены вопросы, которые необходимо решить для гармонизации существующей базы для блоков большой и средней мощности и малых реакторов.

Ключевые слова: реактор малой мощности, активная зона, МАГАТЭ, тепловая мощность реактора, циркуляция теплоносителя, обогащение ядерного топлива, глубина выгорания ядерного топлива, МОХ-топливо, REMIX-топливо, топливный цикл, управление реактивностью.

В последние два десятилетия во всем мире растет интерес к исследованиям и разработкам проектов реакторных установок малой мощности. МАГАТЭ поддерживает и внимательно следит за развитием инновационных технологий данного направления в атомной энергетике. По классификации, предложенной МАГАТЭ [1], следует, что к малым реакторам относятся установки, электрическая мощность которых составляет не более 300 МВт. В настоящее время в рамках МАГАТЭ обсуждаются вопросы безопасности более чем по 25 проектам атомных станций малой мощности (АСММ) с водным теплоносителем наземного размещения [1]. В высокой степени готовности находится ряд проектов для сооружения и ввода их в эксплуатацию в ближайшие годы.

Глава АО «Росатом» А. Е. Лихачёв отметил [2], что Россия дальше других игроков атомного рынка продвинулась в разработке АСММ. ГК «Росатом» активно участвует в деятельности МАГАТЭ по системному продвижению АСММ. В частности, Россия всячески поддерживает инициативы Генерального Директора МАГАТЭ по проведению различных тематических школ, конечной целью которых будет выработка подходов к оценке безопасности применительно к блокам малой мощности.

Во всем мире эталоном нормативного документа для оценки соответствия проектных ре-

шений требованиям безопасности служит документ клуба европейских эксплуатирующих организаций [3], который содержит спецификации и требования к современным энергетическим легководным реакторам (Light Water Reactors, далее LWR). Для LWR эти требования периодически обновляются. Однако обновления не затрагивали требования к реакторным установкам для оценки новых проектов, таких как Small Modular Light Water Reactors (SMLWR).

Основное отличие АСММ от АЭС большой мощности связано в значительной мере со специфическими факторами, касающимися активной зоны реактора, такими, например, как: меньший размер активной зоны реактора (означает большие градиенты плотности энерговыделения и потенциально большая утечка нейтронов);

естественная циркуляция теплоносителя в режимах нормальной эксплуатации;

новые материалы для топливных сборок, такие как «СЕРМЕТ топливо», представляющие собой металлическую матрицу с интегрированными в нее частицами UO_2 . Основное отличие данных материалов в их более высокой теплопроводности;

отказ от частичной перегрузки и применение полной картриджной «перезарядки» активной зоны;

использование топлива с повышенным обогащением (свыше 4,95 %) или смешанного оксидного топлива (МОХ-топлива), представляющего собой смесь оксида плутония и оксида природного урана, а также REMIX-топлива (смесь регенерированного урана и плутония) в качестве основного делящегося материала для топливных сборок;

использование иных методов управления реактивностью, таких, например, как регулирование реактивностью с помощью увеличения или уменьшения утечки нейтронов из активной зоны за счет использования отражателя;

использование новых композитных материалов для оболочек ТВЭЛ вместо циркониевых;

использование иной геометрии топливных элементов или сборок (например, ТВЭЛ в форме пластин).

Цель данной статьи — изучить и систематизировать предложенные разными странами технические решения, касающиеся активной зоны малых реакторов, для последующего анализа возможности гармонизации существующих, в том числе и международных, рекомендаций и требований для блоков большой и средней мощности применительно к малым реакторам.

Потенциальные варианты применения АСММ

Важнейший вопрос для АСММ — роль и место малых реакторов в структуре рынка электроэнергетики, который напрямую связан с региональной энергетической политикой стран и планами развития эксплуатирующих организаций. В отличие от невозобновляемых источников энергии, используемых в традиционной энергетике, АСММ не нуждаются в постоянной доставке больших объемов топлива. Ряд проектов АСММ предусматривает длительный интервал работы реактора между перегрузками, увеличенную топливную компоновку. Также прорабатываются концепции АСММ без перегрузки на площадке, работающие по принципу «батарейки».

Новые рыночные ниши для применения АСММ влияют на требования к проекту АЭС в целом, а также к проекту активной зоны, условиям работы и типу ядерного топлива, в частности.

Варианты применения АСММ, безусловно, определяют и режим работы активной зоны.

Исходя из существующих реалий, для АСММ возможны следующие варианты применения:

выработка электроэнергии в рамках существующей энергосети при работе как в базовом режиме, так и в режиме следования за нагрузкой сети;

работа в отдаленных районах, в сельской местности, в небольших или изолированных сетях,

компенсация сезонного спроса;

производство тепловой энергии по требованию конкретных промышленных потребителей, например, для производства водорода;

производство радиоизотопов для промышленности или медицинского применения;

резервный источник энергии (большую часть времени работает в режиме ожидания);

нахождение в подкритическом состоянии в режиме транспортировки для картриджной перегрузки за пределами площадки или в случаях, когда необходимо транспортировать реакторный модуль в целом на перегрузку.

Все эти варианты не являются взаимоисключающими, и их сочетание также возможно. Выбор одного из перечисленных режимов будет определять требования к активной зоне в целом и топливу в частности. Например, в случае работы блока в режиме ядерной батарейки обеспечение безопасной транспортировки загруженного, но не выведенного на мощность реактора будет во многом определять конструкцию, материалы и механическую надежность активной зоны и топлива.

Следует отметить, что в настоящее время требования, в том числе и международные, относятся к реакторным установкам (РУ), традиционно участвующим только в выработке электрической и тепловой энергии, и не рассматривают указанный выше широкий сектор их многоцелевого использования. Исходя из этого, развитие АСММ, несомненно, повлечет за собой пересмотр/уточнение/дополнение существующих как федеральных норм и правил, так и международных норм и рекомендаций в области безопасного использования атомной энергии. Например, в действующих нормативных документах федерального уровня отсутствуют такие понятия, как «реактор интегрального типа», «малый модульный реактор».

Анализ проектов реакторов малой мощности

Инновационные решения и технические характеристики реакторов малой мощности с водным теплоносителем наземного размещения, планируемых к сооружению и представленных в отчете МАГАТЭ [1], сведены в табл. 1.

Таблица 1

Малые модульные реакторы с водным теплоносителем наземного размещения

Проект/ разработчик, страна	Тип	Мощность тепловая/ электрическая	Циркуляция	Тип топлива	Глубина выгорания, ГВт/т	Топливный цикл (месяцы)	Обогащение, %	Воздействие на реактив- ность	Статус
SAREM/CNEA, Аргентина	Интегральный ВВЭР	100/30	ЕЦ	UO ₂	24	14	3,1	Только с помо- щью рабочей группы	Сооружается UC
ACP100/CNNS, Китай	Интегральный ВВЭР	385/125	ГЦН	UO ₂	52	24	<4,95	Только с помо- щью рабочей группы	Рабочая доку- ментация DD
SANDU SMRTM/ Sandu Energy Inc, Канада	Тяжеловодный	960/300	ГЦН		5,8	Непрерывная перегрузка	Необогащен- ный уран	Только с помо- щью рабочей группы	Концептуаль- ный проект С
SAP200/CGNPC, Китай	ВВЭР	660/>200	ГЦН	UO ₂	37	24	4,2	С помощью ра- бочей группы и борного регу- лирования	Концептуаль- ный проект С
DHR400/Corproat ion (CNNS), Ки- тай	Бассейновый	400/-	ГЦН	UO ₂	30	10	<5,0	Только с помо- щью рабочей группы	Проектная до- кументация BD
HAPPY200/ SPIC, China	ВВЭР	200/0	ГЦН	UO ₂	40	18	2,76 среднее 4,45 макси- мальное	Только с помо- щью рабочей группы	Рабочая доку- ментация DD
TEPLATOR TM/ UWB Pilsen & SPRC STU, Че- хия	Каналы внутри корпуса реактора	50/0	ГЦН	UO ₂	2,3	10	Отработанное в ВВЭР топли- во (< 1,2 % U-235)		Концептуаль- ный проект С
NUWARD TM/ EDF-led consortium with CEA, Naval Group, and Technic Atome	Интегральный ВВЭР	2 × 540/2 × 170	ГЦН	UO ₂		24	<5,0	Только с помо- щью рабочей группы	Концептуаль- ный проект С
IRIS/ IRIS, Международная кооперация	Интегральный ВВЭР	1000/335	ГЦН	UO ₂	65 (max)	48	5,0	Только с помо- щью рабочей группы	Проектная до- кументация BD

Таблица 1 (продолжение)

Проект/ разработчик, страна	Тип	Мощность тепловая/ электрическая	Циркуляция	Тип топлива	Глубина выгорания, ГВт/т	Топливный цикл (месяцы)	Обогащение, %	Воздействие на реактив- ность	Статус
DMS/Hitachi-GE Nuclear Energy, Япония	Кипящий ВВЭР	840/300	ЕЦ	UO ₂	<60	24	<5,0	Только с помо- щью рабочей группы	Проектная до- кументация ВД
IMR/Mitsubishi Heavy Industries, Япония	Интегральный ВВЭР	1000/350	ЕЦ	UO ₂	>40	26	4,8	Только с помо- щью рабочей группы	Концептуаль- ный проект С
SMART/KAERI, Республика Ко- рея	Интегральный ВВЭР	365/107	ГЦН	UO ₂	<54	36	<5	Только с помо- щью рабочей группы	Концептуаль- ный проект С
РИТМ-200, АО «ОКБМ Афри- кантов», Россия	Интегральный ВВЭР	165/53	ГЦН	UO ₂		72 – 84	<20	Только с помо- щью рабочей группы	Стадия лицен- зирования
ЕЛЕНА НИЦ «Курчатов- ский институт», Россия	ВВЭР	3,3/0,068	ЕЦ	UO ₂ с опцией МОХ топливо	57/27	300	15,2	Только с помо- щью рабочей группы	Концептуаль- ный проект С
КАРАТ-45 НИКИЭТ, Россия	Кипящий	180/45 – 50	ЕЦ	UO ₂	45,9	84	4,5	Только с помо- щью рабочей группы	Концептуаль- ный проект С
КАРАТ-100/ НИКИЭТ Россия	Кипящий	360/100	ЕЦ	UO ₂	45,9	90	4,0	Только с помо- щью рабочей группы	Концептуаль- ный проект С
РУГА-70 НИКИЭТ, Россия	Бассейновый	70/-	ЕЦ до 30 % мощности, свыше 30 % — ГЦН	Sermet UO ₂	25 – 30	36	3,0	Только с помо- щью рабочей группы	Концептуаль- ный проект С
UNITHERM НИКИЭТ, Россия	ВВЭР	30/6,6	ЕЦ	Sermet UO ₂	1,15	200	19,75	Только с помо- щью рабочей группы	Концептуаль- ный проект С
УК-300 НИКЭТ, Россия	Кипящий	750/250	ЕЦ	UO ₂	41,4	72	4,0	Только с помо- щью рабочей группы	Рабочая доку- ментация ДД

Таблица 1 (окончание)

Проект/ разработчик, страна	Тип	Мощность тепловая/ электрическая	Циркуляция	Тип топлива	Глубина выгорания, ГВт/т	Топливный цикл (месяцы)	Обогащение, %	Воздействие на реактив- ность	Статус
UK-SMR Ролс-Ройс, Великобритания	ВВЭР	1276/443	ГЦН	UO ₂	55 – 60	18 – 24	< 4,95	С помощью ра- бочей группы стержней из Gd ₂ O ₃ и стержней с бором	Концептуаль- ный проект С
mPower BWX Technolo- gies Inc., США	Интегральный ВВЭР	575/195	ГЦН	UO ₂	< 40	24	< 5	Только с помо- щью рабочей группы	Концептуаль- ный проект С
NuScale NuScale Power, LLC, США	Интегральный ВВЭР	160/50 × 12	ЕЦ	UO ₂	> 30	24	< 4,95	Только с помо- щью рабочей группы	Стадия лицен- зирования
BWRX-300 GE-Hitachi Nuclear Energy, and Hitachi-GE Nuclear Energy, США, Япония	Кипящий	870/270 – 290	ЕЦ	UO ₂ / 10 × 10 array	49,5	12 – 24	3,40 (avg)/ 4,95 (max)	С помощью ра- бочей группы с поглотителем из В ₄ C, Hf, Gd ₂ O ₃	Подготовка к лицензирова- нию в UK, в Canada и в US
SMR-160 Holtec International, США	ВВЭР	525/160	NC	UO ₂	45	18 – 24	4,95 (max)	С помощью ра- бочей группы и борного регу- лирования	Стадия лицен- зирования
Westinghouse SMR Westinghouse Electric Company LLC, США	Интегральный ВВЭР	800/>225	ГЦН	UO ₂	> 62	24	< 5		Концептуаль- ный проект С

Многие из представленных в табл. 1 проектов РУ являются в разном приближении уменьшенными версиями больших реакторов (PWR, ВВЭР, ВWR). Тем не менее, инновационные свойства их топлива и методы управления оказывают существенное влияние на характеристики активной зоны. Ряд из них работают на естественной циркуляции (ЕЦ), на некоторых предусмотрен отказ от борного регулирования.

Типы реакторов

Очевидно, что основные характеристики активной зоны и топлива зависят от типа реактора. Среди представленных типов реакторов доминируют два типа — ВВЭР (16 проектов — 64 %) и кипящие реакторы (5 проектов — 20 %) (табл. 2). Кроме того, есть проекты тяжеловодных реакторов и реакторов бассейнового типа. Ряд предлагаемых технических решений, в том числе и решения по реакторам бассейнового типа, сегодня не учтены в существующих нормативных документах, в том числе и международных.

Тепловая мощность реакторов

Уровень тепловой мощности является важным параметром как с коммерческой точки зрения, так и технической. Как видно из табл. 3 тепловую мощность в пределах 300 – 1000 МВт имеют 16 реакторов (60 %). Однако на сегодняшний день в российских нормативных документах федерального значения реакторы по уровню мощности не разделяются.

Тип циркуляции теплоносителя в первом контуре

Способ организации циркуляции теплоносителя (табл. 4) сильно влияет на режимы эксплуатации реактора. В частности, естественная циркуляция (ЕЦ) зависит от подогрева теплоносителя и гидростатического напора. В реакторах с ЕЦ трудно обеспечить работу в маневренных режимах из-за малой движущей силы по сравнению с принудительной циркуляцией.

Для проектов, использующих естественную циркуляцию, характерны следующие специфические факторы:

Таблица 2

Типы реакторов

Тип реактора	Количество проектов	% от общего числа
Реактор с водой под давлением (ВВЭР)	16	64
Кипящий реактор	5	20
Тяжеловодный реактор	1	4
Реактор бассейнового типа	2	8
Иной	1	4

Таблица 3

Тепловая мощность реакторов

Тепловая мощность активной зоны, МВт	Количество проектов	% от общего числа
0 – 10	1	4
10 – 100	4	16
100 – 300	5	20
300 – 1000	15	60

Таблица 4

Тип циркуляции теплоносителя в первом контуре

Тип циркуляции в первом контуре	Количество проектов	% от общего числа
Естественная циркуляция	11	44
Принудительная циркуляция	13	52
Использование комбинированной циркуляции (естественная, при мощности менее 30 % и принудительная, при мощности более 30 %)	1	4

неравномерное распределение тепловой энергии по объему активной зоны. Этот факт необходимо учитывать при планировании загрузки топлива и выгорающего поглотителя,

а также схемы размещения регулирующих стержней;

сильные обратные связи (большие значения коэффициентов реактивности по температуре и плотности теплоносителя);

достаточно медленный пуск реактора и выход на номинальные параметры из-за осцилляции потока теплоносителя.

Проекты с реакторами бассейнового типа обладают своими особенностями, связанными с теплогидравликой и обоснованием кризиса теплообмена. В таких реакторах, в отличие от традиционных решений, имеют место продольное, поперечное омывание ТВЭЛ, а также противотоки и застойные области.

Типы топлива

В проектах малых реакторов, представленных в документе МАГАТЭ [1], описаны три типа топлива (табл. 5).

Традиционное керамическое топливо в реакторах с водным теплоносителем характеризуется низкой теплопроводностью и, как следствие, низкой скоростью передачи тепла (при увеличении мощности) от топлива к теплоносителю. Это накладывает ограничение на скорость изменения мощности и ограничивает маневренность блока.

Инновационное топливо состоит из частиц UO_2 в металлической матрице (силумин или цирконий). Использование металлической матрицы обеспечивает минимальное распухание и высокую теплопроводность. Теплообмен от топлива к теплоносителю значительно выше. Как правило, такое топливо используется в транспортных установках. Но в настоящее

время намечена тенденция использования данного вида топлива и в АЭС наземного размещения. Этот вид топлива наиболее перспективен с точки зрения безопасности, надежности и возможности работы в маневренном режиме.

Необходимо отметить, что некоторые проекты малых реакторов, использующие топливо UO_2 (например, проект «ЕЛЕНА»), рассматривают возможность использования и МОКС-топлива. Более того, в настоящее время для инновационных конструкций топлива обсуждается возможность использования «non-oxide fuel» топлива, содержащего рециклированный плутоний.

Ниже приведены варианты потенциально возможных видов топлива для перспективных проектов активных зон АСММ:

- уран-нитридное топливо (Uranium nitride);
- уран-карбидное топливо (Uranium carbide);
- уран-плутониевое нитридное топливо (Pu-U nitrides);
- ториевое топливо (Thorium).

Однако в существующих нормативных актах не содержатся требования по этим инновационным материалам как в целом, так и по пределам и условиям безопасной эксплуатации по топливу, в частности.

Все вышеуказанное неизбежно приведет к пересмотру целого ряда положений существующих нормативных актов.

Обогащение ядерного топлива

Обогащение в большей степени зависит от типа топлива. Для обеспечения подкритичности топлива на всех этапах жизненного цикла топлива (в первую очередь, при производстве и транспортировке топлива) в требованиях большинства нормативных актов для реакторов большой и средней мощности установлено ограничение по обогащению на уровне 5 %. В ряде концептуальных проектов малых реакторов рассматриваются варианты с обогащением ядерного топлива, превышающем этот предел:

обогащение 0 – 5 % 22 проекта
обогащение 5 – 20 % 3 проекта

Это связано с необходимостью обеспечения более длительного периода эксплуатации между перегрузками и для компенсации более высокой утечки нейтронов в физически меньших размерах активной зоны.

Таблица 5

Типы топлива для малых реакторов

Тип топлива	Количество проектов	% от общего числа
Керамическое (топливные таблетки) UO_2	21	84
Инновационное керметное топливо	2	8
Керамическое топливные таблетки UO_2 с опцией МОХ-топлива	1	4
Не представлено	1	4

Более высокое обогащение топлива также влияет на некоторые свойства топлива. Например, это приводит к менее сильному отрицательному температурному коэффициенту реактивности по температуре топлива за счет более низкой концентрации ^{238}U . Однако использование выгорающих поглотителей и специальных составов матрицы топлива может изменить этот эффект (например, топливо для реактора TRIGA). Более высокое обогащение может привести к более жесткому спектру нейтронов, что, в свою очередь, влияет на нейтронные свойства активной зоны (например, более низкая эффективность регулирующих стержней и выгорающего поглотителя). Этот эффект может быть использован для улучшения характеристик реактора или скорректирован за счет изменения геометрии и состава материалов тепловыделяющей сборки (ТВС).

Таблица 6

Глубина выгорания топлива

Выгорание топлива, ГВт/т	Количество проектов	% от общего числа
1 – 10	3	12
11 – 20	—	—
21 – 30	3	12
31 – 40	6	24
41 – 50	4	16
50 – 60	5	20
Более 60	2	8
Не представлено	2	8

Таблица 7

Глубина выгорания топлива активной зоны

Глубина выгорания также как и обогащение, зависит от типа топлива. Благодаря своим превосходным термомеханическим свойствам инновационное керамическое топливо способно достигать более высоких значений выгорания топлива (до 95 – 122 ГВт/т), чем у обычного керамического топлива, применяемого в современных энергетических реакторах с водным теплоносителем. Глубина выгорания в таких реакторах, как правило, не превышает 55 – 60 ГВт/т. Распределение глубины выгорания топлива представлено в табл. 6.

Продолжительность топливного цикла

Продолжительность топливного цикла (месяцы)	Количество проектов	% от общего числа
1 – 10	3	12
11 – 20	2	8
21 – 30	11	44
31 – 40	2	8
41 – 50	1	4
70 – 90	4	16
Более 90	2	8
On-line	1	4

Продолжительность топливного цикла

Разброс значений по длительности топливного цикла меняется в пределах от 10 до 300 месяцев, что видно из табл. 7.

Длительность топливного цикла тесно связана с типом топлива, обогащением, тепловой мощностью и другими параметрами. Также видно, что основное количество проектов (11 проектов — 44 %) предусматривает 24-месячный топливный цикл. Такое решение связано с существующими нормативами ревизии основного оборудования АЭС. Увеличение продолжительности топливного цикла неизбежно ведет к пересмотру норм по техническому обслуживанию, ремонту и контролю металла.

Управление реактивностью

Малый размер активной зоны приводит к высокой утечке нейтронов, а также к существенной неравномерности нейтронного потока и разной ценности нейтронов в центре и на периферии активной зоны. Как следствие, в активных зонах малых реакторов будет иметь место существенное различие в эффективности центральных и периферийных органов системы управления и защиты (СУЗ), а также более сложная форма кривой дифференциальной эффективности СУЗ от высоты. Таким об-

разом, центральный стержень СУЗ будет существенно менее эффективен в крайних положениях (90 % введен или 90 % выведен).

Вторая система воздействия на реактивность традиционно может включать как борное регулирование (как на ВВЭР большой мощности), так и воздействие на реактивность при помощи отражателя или поглотителя. Способ регулирования отражателем малоприменим для больших реакторов, однако он может дать определенный эффект в случае малого размера активной зоны и при существенной утечке нейтронов.

Во многих проектах АСММ, представленных в [1], для управления реактивностью не используется раствор борной кислоты по следующим причинам:

снижение коррозии конструкционных материалов и избежание образования отложений бора на топливных стержнях;

отсутствие необходимости обращения с отходами небалансного раствора борной кислоты при больших водообменах и, таким образом, снижение эксплуатационных расходов, а также меньшее воздействие на окружающую среду.

Однако «безборная» концепция управления реактивностью при длительной эксплуатации реактора без перегрузки топлива для компенсации избыточной реактивности потребует применения дополнительных поглощающих материалов или использование большего количества управляющих стержней, что для малой активной зоны может оказаться проблемой. Это, в свою очередь, приведет к увеличению твердых радиоактивных отходов (отработанные поглощающие элементы (ПЭЛ) СУЗ). Это, конечно, мало повлияет на гармонизации нормативных актов в части технических решений по активной зоне, но при выборе вариантов применения АСММ это надо учитывать. Изменение спектра нейтронов и геометрии ТВС, а также необходимость работы в маневренных режимах может привести к необходимости использования сложных композиций материалов ПЭЛ СУЗ (B_4C , Hf , $Ag-In-Cd$, Du и др.) или комбинации разных типов органов управления для компенсации избыточной реактивности и оперативного регулирования.

В случае отказа от борного регулирования, согласно требованиям федеральных норм и правил, следует предусмотреть альтернативную (диверсную) систему контроля реактивности.

Всегда существует компромисс между выбором материала выгорающего поглотителя или количеством управляющих стержней. Наиболее эффективными и изученными материалами для компенсации избыточной реактивности в течение кампании в активной зоне реактора являются выгорающие поглотители из бора, гадолиния и эрбия. В качестве жидкого поглотителя может использоваться азотно-кислый кадмий.

Еще одним важным параметром, который зависит от длины ТВС, является минимальное время падения регулирующего стержня. Ожидается, что из-за малых размеров реактора время срабатывания аварийной защиты будет гораздо меньше.

При управлении реактивностью АСММ необходимо учитывать особенности систем и методов контроля нейтронного потока: чувствительность датчиков, их размещение и изменение достоверности показаний аппаратуры контроля нейтронного потока в зависимости от типа и положения регулирующих стержней, положения отражателя или поглотителя (если такая система используется).

Статус проекта

В настоящее время в мире ведется детальная проработка двух проектных и технических решений (8 %). Из 25 проектов 14 находятся на стадии анализа и принятия концептуальных решений (56 %), 4 — на стадии разработки проектной документации (16 %), 3 — на различных стадиях рассмотрения надзорными органами. И только 2 проекта находятся в стадии строительства (табл. 8).

Первый проект из максимально реализованных — CAREM — это национальный проект реакторов малой мощности, координируемый Аргентинской национальной комиссией по атомной энергии (CNEA) в сотрудничестве с ведущими ядерными компаниями Аргентины. Выдана лицензия на сооружение. Первый бетон для неядерных зданий был залит в феврале 2014 г.

Второй — Китайский проект АСР100. По сообщению китайских СМИ от 14 июля 2021 г., КНР начала строительство малого модульного реактора на АЭС «Линлун-1». Мощность энергоблока составляет 125 МВт.

Россия анонсировала строительство АСММ в целом ряде дружественных нам государств как в ближнем, так и дальнем зарубежье. На-

Таблица 8

Статус проекта	Аббревиатура	Количество проектов	% от общего числа
Сооружение АЭС (Under construction)	UC	2	8
Разработана рабочая документация (Detailed design)	DD	2	8
Разработан концептуальный проект (Conceptual)	C	14	56
Разработана проектная документация (Basic design)	BD	4	16
Документация передана в надзорный орган (Under regulatory review)	R	3	12

ряду с подписанными соглашениями по строительству АСММ в Узбекистане [4], готовится соглашение о намерениях с правительством Бразилии.

Заключение

Ядерные реакторы малой мощности являются технологически сложными объектами, технические проблемы в которых решены ещё не все.

Проведенный анализ технических решений и характеристик активных зон реакторов малой мощности демонстрирует значительный прогресс в разработке инновационных проектов, направленных на расширение применения атомной энергетики в новых рыночных нишах. Систематизация данных по 25 международным проектам позволила выявить ключевые тенденции и технологические особенности, отличающие АСММ от традиционных реакторов большой мощности.

Преобладание проектов с реакторами типа ВВЭР и кипящих реакторов, а также использование естественной циркуляции теплоносителя подчеркивают стремление разработчиков к упрощению конструкции реакторов и повышению их безопасности.

Однако существуют и технические ограничения проектов. Малые размеры активной зоны увеличивают утечку нейтронов, усложняя управление реактивностью и распределение энерговыделение. Длительные топливные циклы (до 300 месяцев) и повышенное обогащение топлива требуют пересмотра норм по обслуживанию, контролю металла и обращению с радиоактивными отходами.

Существующие нормативные документы, ориентированные на реакторы большой мощности, не учитывают специфику АСММ, включая использование топлива с обогащением

свыше 5 %, картриджную перезагрузку и интегральные конструкции. Также требуется гармонизация международных стандартов для обеспечения безопасности при транспортировке реакторных модулей, работе в режиме «ядерной батарейки» и многоцелевом применении (энергоснабжение изолированных регионов, производство водорода, резервное энергообеспечение).

Большинство проектов РУ малой мощности (56 %) находятся в концептуальной стадии, что свидетельствует о необходимости дальнейших НИОКР и инвестиций. Два проекта (CAREM в Аргентине и АСР100 в Китае) перешли к этапу строительства. Однако ни один из 25 рассмотренных проектов полностью не удовлетворяет требованиям современных нормативных документов, что говорит о необходимости совершенствования нормативно-законодательной базы, регуливающей реакторы малой мощности.

Российские разработки (РИТМ-200, КАРАТ, РУТА) демонстрируют высокий потенциал, находясь на стадиях лицензирования и рабочего проектирования, что укрепляет позиции РФ на глобальном рынке АСММ. Россия имеет большой опыт в разработке и эксплуатации РУ малой мощности транспортного назначения. Общая наработка таких РУ составляет более 11 000 реакторо-лет. Имеющиеся компетенции и опыт позволяют нашей стране и дальше развивать тематику АСММ. Сегодня в России проходит процедуру лицензирования первая в мире АСММ наземного размещения с реакторной установкой РИТМ-200, сооружение которой планируется в посёлке Усть-Куйга в Якутии для электроснабжения золоторудного месторождения Кючус, оловорудного месторождения Депутатское и месторождения россыпного олова Тирехтях. Запуск первого энерго-

блока ожидается в 2027 г., ввод в эксплуатацию — в 2028 г. В 2024 г. ГК «Росатом» заключила первый экспортный контракт на сооружение АСММ из шести блоков в Республике Узбекистан общей мощностью 330 МВт. Поэтапный ввод в эксплуатацию намечен на период с 2029 по 2033 гг.

Таким образом, перспективы развития реакторов малой мощности связаны с адаптацией нормативной базы, внедрением цифровых систем управления и углублением международной кооперации. Результаты данного исследования формируют основу для дальнейшего анализа безопасности, экономической эффективности и экологической устойчивости АСММ, что особенно актуально в условиях глобального перехода к низкоуглеродной энергетике.

Список литературы

1. **Advances in Small Modular Reactor. Technology Developments.** [Электрон. ресурс] https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf (дата обращения 05.05.2025).
2. **Конференция МАГАТЭ по малым модульным реакторам** [Электрон. ресурс] <https://cntd.ru/news/read/konferenciia-magate-po-malym-modulnym-reaktoram> (дата обращения 05.05.2025).
3. **European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plant — document, rev. E (2017).** [Электрон. ресурс] https://europeanutilityrequirements.eu/sites/default/files/2022-11/TOC%20Chapter%201_2.pdf (дата обращения 07.05.2025).
4. **«Росатом» построит первую зарубежную АЭС малой мощности в Узбекистане** [Электронный ресурс] <https://strana-rosatom.ru/2024/05/27/rossiya-i-uzbekistan-podpisali-soglash/?ysclid=mbavu50hj300111615> (дата обращения 12.05.2025).

References

1. **Advances in Small Modular Reactor. Technology Developments,** [Electronic resource]. — URL: https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf (accessed: 05.05.2025).
2. **Konferenciya MAGATE' po malym modul'ny'm reaktoram** (IAEA Conference on Small Modular Reactors), [Electronic resource]. — URL: <https://cntd.ru/news/read/konferenciia-magate-po-malym-modulnym-reaktoram> (accessed: 05.05.2025).
3. **European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plant — document, rev. E, 2017,** [Electronic resource]. — URL: https://europeanutilityrequirements.eu/sites/default/files/202211/TOC%20Chapter%201_2.pdf (accessed: 07.05.2025).
4. **«Rosatom» postroit pervuyu zarubezhnyuyu AE'S maloj moshhnosti v Uzbekistane** (Rosatom to Build First Foreign Low-Capacity Nuclear Power Plant in Uzbekistan), [Electronic resource]. — URL: <https://strana-rosatom.ru/2024/05/27/rossiya-i-uzbekistan-podpisali-soglash/?ysclid=mbavu50hj300111615> (accessed: 12.05.2025).

KhvostovaMS@mpei.ru

Дата поступления 30.03.2025

Дата принятия к публикации 25.04.2025

Analysis of characteristics and innovative solutions of small modular reactors cores

Chetverikov A. E., Soldatov I. M., Khvostova M. S., Soldatov A. I.

The article opens a series of publications on the development of innovative projects of small modular reactors. The article systematizes and analyzes technical solutions and characteristics proposed by different countries concerning the core of small modular reactors, such as reactor type, thermal capacity, type of primary circulation, type, enrichment and burnout depth of nuclear fuel, fuel cycle, reactivity control and project status. The issues that need to be resolved in order to harmonize the regulatory framework for large and medium-power units and small reactors are highlighted.

Keywords: small modular reactors, reactor core, IAEA, thermal capacity, primary circulation, fuel enrichment, fuel burnup, MOX fuel, REMIXfuel, fuel cycle, reactivity control.



ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

DOI: 10.71759/8hwf-5k34

Специальность 2.4.4. Электротехнология и электрофизика

О разработке систем управления термоэлектрическими установками для охлаждения жидких теплоносителей

Кожеченко А. С., канд. техн. наук
АО «ЦНИИАГ», Москва

Щербаков А. В., доктор техн. наук, **Родякина Р. В.**, канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Актуальность внедрения термоэлектрических установок для организации систем охлаждения промышленного оборудования, лабораторной и медицинской техники обусловлена высокой надежностью, компактностью и экологичностью холодильных машин на основе модулей Пельтье. Показано, что для создания систем управления температурой жидких теплоносителей в случае применения термоэлектрических установок требуется создание методического подхода и анализ процессов в системе «холодильная машина – теплообменный контур». На основе проведенного анализа выявлена необходимость автоматического управления режимом сброса тепла с «горячей стороны» термоэлектрической батареи и реализации регулятора температуры в виде цифрового ПИД-регулятора с увеличенным временем квантования. Значение устанавливаемого интервала квантования будет определяться транспортной задержкой переноса жидкости от холодильника к объекту.

Ключевые слова: термоэлектрическое охлаждение, эффект Пельтье, транспортная задержка, ПИД-регулятор, нелинейный объект, цифровая система управления.

Потребность в применении устройств для охлаждения жидких теплоносителей, перемещаемых по замкнутому контуру, существует в самых разных областях машиностроения. Так, например, водоохлаждающие машины (чиллеры) используют для организации контуров охлаждения промышленного оборудования — станков, насосов, печных и нагревательных установок. В таких системах требуемая точность поддержания температуры обычно невысока и составляет 2 – 3 °С [1]. Более высокие требования предъявляются к чиллерам, используемым для охлаждения промышленных лазеров [2], установкам для выращивания монокристаллов и нанесения покрытий [3], лабораторному и медицинскому оборудованию — от 0,1 до 1 °С. [4, 5]. Однако как промышленные, так и настольные чиллеры, как правило, представляют собой стационарно размещаемые устройства, в которых используются пароконденсационные холодильные установки. К недостаткам таких установок следует отнести то, что из-за наличия контура

с хладагентом, меняющим свое агрегатное состояние с жидкого на парообразное и обратно, возникают требования к герметизации системы, необходимости периодической дозаправки хладагента, ограничению механических и вибрационных воздействий и пространственному положению. Кроме того, срок службы пароконденсационных холодильных машин ограничен ресурсом компрессора из-за износа его подвижных частей.

Приведенные ограничения не распространяются на термоэлектрические холодильные машины, построенные на базе модулей Пельтье. Известно, что эффект Пельтье заключается в том, что при протекании постоянного тока через последовательно соединенные проводники из разнородных материалов в месте их соединения поглощается или выделяется некоторое количество тепла, которое можно регулировать, изменяя значение тока. Если изменить направление протекания тока, то области нагрева и охлаждения поменяются местами. При этом функциональную роль хладагента

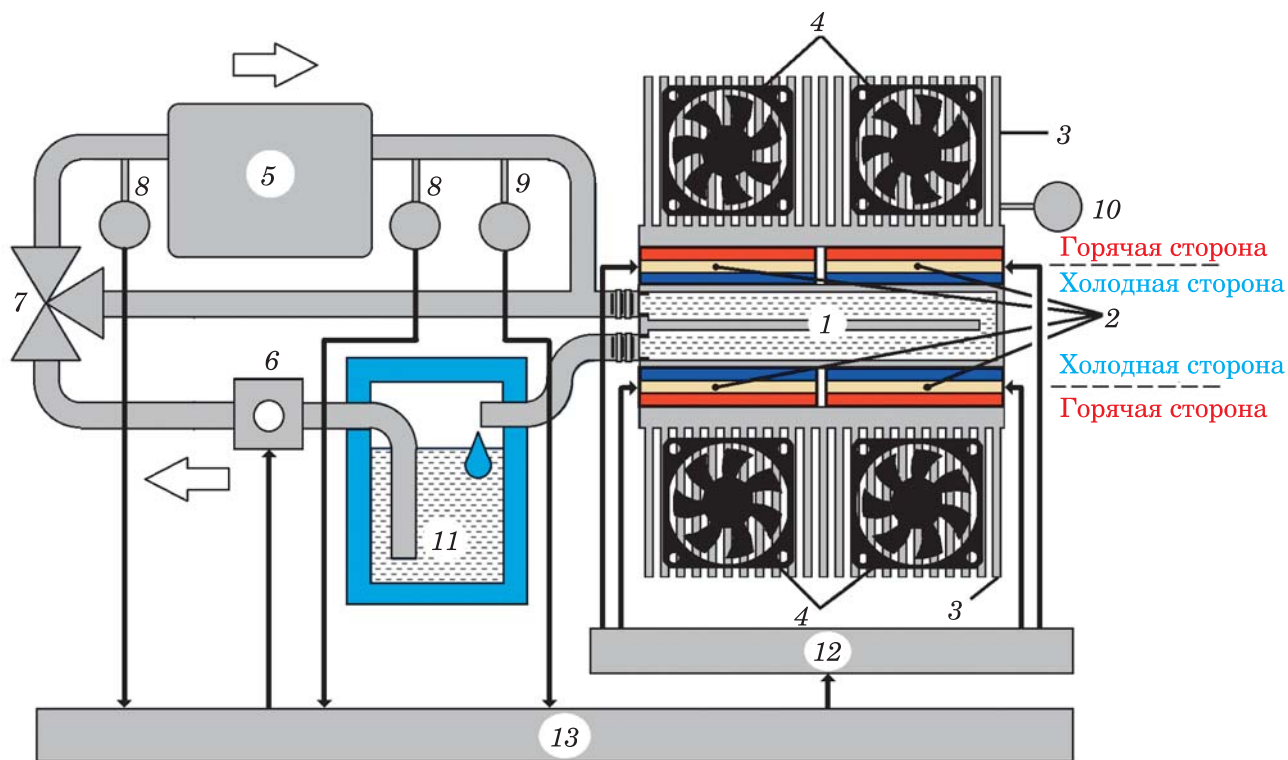


Рис. 1. Функциональная схема термоэлектрической холодильной машины для управления температурой жидкого теплоносителя, перемещаемого по замкнутому контуру:

1 — теплообменник; 2 — модуль Пельтье; 3 — радиатор; 4 — вентилятор; 5 — охлаждаемый объект; 6 — насос; 7 — дроссель; 8 — датчик температуры жидкости; 9 — датчик потока жидкости; 10 — датчик температуры радиатора; 11 — резервуар с жидкостью; 12 — блок питания модулей Пельтье; 13 — система управления

в термоэлектрической холодильной машине играет электронно-дырочный газ полупроводников [6]. Простота схемы, отсутствие движущихся частей, шума делают термоэлемент Пельтье чрезвычайно перспективным источником холода [7]. Следует отдельно сказать о возможности работы в любом пространственном положении и экологичности, поскольку отсутствует опасность выброса в атмосферу газов и паров, представляющих потенциальную угрозу для озонового слоя. Для управления холодопроизводительностью такой машины достаточно изменить значение постоянного тока термоэлектрического модуля, что упрощает интеграцию в контур управления, поскольку отсутствуют какие-либо устройства-посредники — насосы, подогреватели, поршневые группы.

На первый взгляд может показаться, что создание автоматизированной холодильной машины на базе модулей Пельтье — это типовая инженерная задача. Однако можно убедиться, что для расчета и проектирования таких устройств пока еще отсутствует методический подход. Это связано с нелинейностью

объекта управления, обусловленной зависимостью холодопроизводительности термоэлементов от перепада температуры между горячим и холодным спаем, технической сложностью задачи управления сбросом тепла, влиянием джоулевых потерь и паразитной теплопроводности самих термоэлементов на эффективность охлаждения [8, 9]. Кроме того, необходим учет инерционности процессов охлаждения и наличия транспортной задержки в контуре жидкого теплоносителя, а также возмущающих воздействий на работу устройства. Данные обстоятельства приводят к необходимости создания методического подхода к проектированию специализированных систем управления термоэлектрическим охлаждением жидких теплоносителей, перемещающихся по замкнутому контуру. Для разработки таких систем необходимо провести комплексный анализ термоэлектрической холодильной машины как объекта управления и определить структуру и параметры системы управления данным объектом.

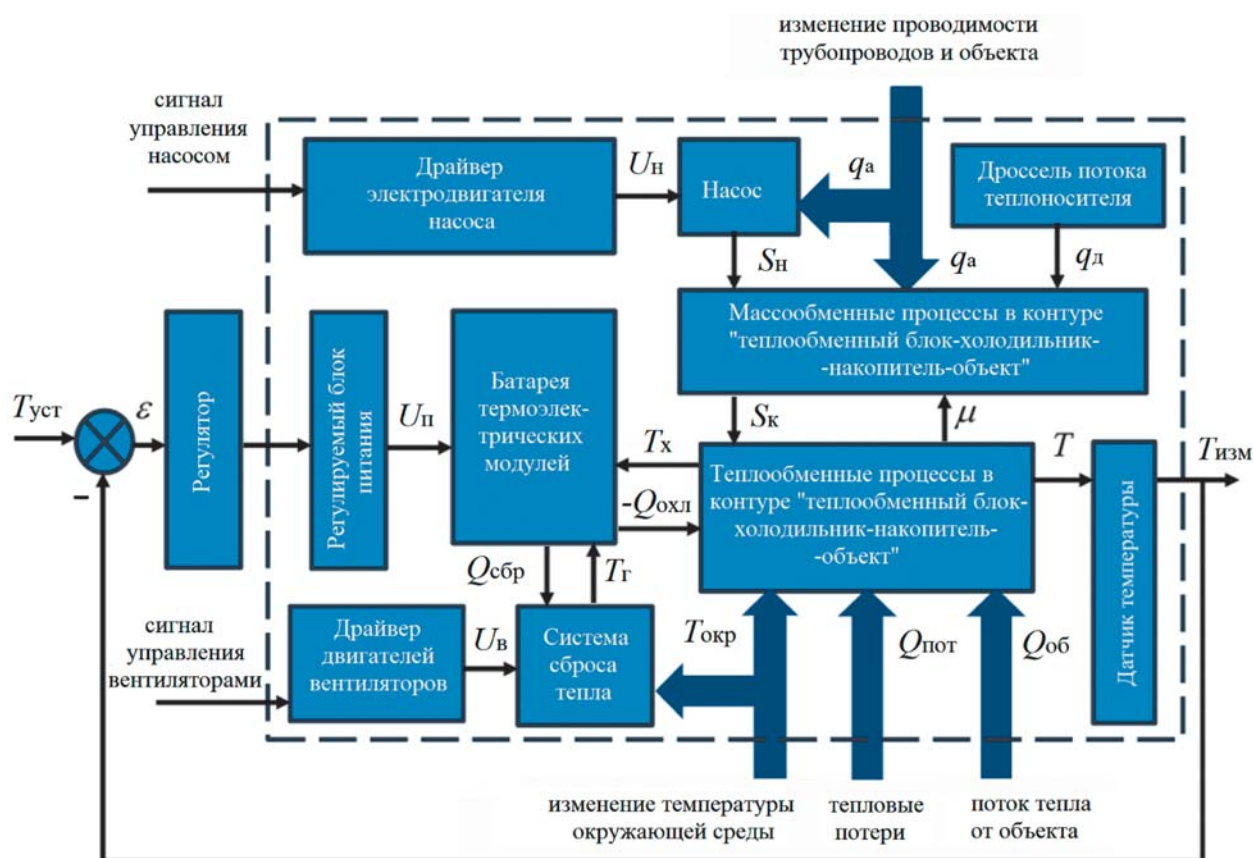


Рис. 2. Структура термоэлектрической холодильной машины в качестве объекта управления

Анализ термоэлектрической холодильной машины в качестве объекта управления

Функциональная схема термоэлектрической холодильной машины, предназначенной для управления температурой жидкого теплоносителя, приведена на рис. 1. Контурными стрелками показано направление движения теплоносителя.

Жидкость проходит через теплообменник 1, где она охлаждается с помощью управляемых подаваемым напряжением от блока питания 12 термоэлектрических элементов Пельтье 2. Для отвода тепла от «горячей» поверхности термоэлектрических элементов применяются радиаторы 3, а для интенсификации конвективного теплообмена — вентиляторы 4. Основной функцией устройства является подача охлажденной жидкости к объекту 5, а для создания потока этой жидкости применяется насос 6. Дроссель 7 служит для регулирования давления в системе, а также для создания резервной байпасной линии течения жидкости, необходимой, если, например, произойдет аварийное перекрытие потока в охлаждаемом объекте.

Обычно предъявляется требование к минимизации перепада температуры между вход-

ным и выходным патрубками охлаждаемого объекта, поэтому он подключается не сразу после теплообменника, а после накопителя жидкости 11 (резервуара). По этой же причине для контроля упомянутого перепада необходимы два датчика температуры 8. Контроль протока жидкости осуществляется датчиком потока 9, а контроль температуры радиаторов — датчиком температуры 10. Все сигналы передаются в систему управления 13, которая по данным о температуре и величине потока жидкости осуществляет управление модулями Пельтье и насосом. Основной задачей системы управления является стабилизация температуры в области охлаждаемого объекта, измеряемой датчиками 8.

На рис. 2 показана внутренняя структура объекта управления — термоэлектрической холодильной машины (выделена штриховой линией), а также регулятор температуры, входные, выходные сигналы и возмущающие воздействия (показаны стрелками). Температура теплоносителя T измеряется датчиком, передающим в цепь обратной связи сигнал $T_{изм}$. Требуемая температура задается сигналом уставки $T_{уст}$, из которого вычитается сиг-

нал, измеряемый датчиком $T_{\text{изм}}$, и определяется рассогласование ε :

$$\varepsilon = T_{\text{уст}} - T_{\text{изм}} \quad (1)$$

Рассогласование является входным сигналом для регулятора, воздействующего на управляемый источник питания, клеммы которого подключены непосредственно к термоэлектрическим модулям. Напряжение $U_{\text{п}}$, подаваемое на клеммы модулей, определяет ток термоэлементов, а значит и холодопроизводительность холодильной машины.

Батарея термоэлектрических модулей взаимодействует с системой сброса тепла (горячая сторона) и теплообменным блоком (холодная сторона). Тепловой поток $Q_{\text{сбр}}$, отводимый системой сброса тепла, определяется конструкцией радиаторно-вентиляторного блока и частотой вращения вентиляторов, что будет сказываться на температуре горячей стороны $T_{\text{г}}$, которая, в свою очередь, начнет влиять на холодильный коэффициент и на температуру холодной стороны термоэлектрических модулей $T_{\text{х}}$. Сигнал управления вентиляторами поступает на драйвер электродвигателей, подающий на них сигнал $U_{\text{в}}$. В установившемся режиме работы при температуре на холодной стороне батареи $T_{\text{х}}$ происходит охлаждение теплоносителя и величина теплового потока $Q_{\text{охл}}$ будет определяться эффективностью работы теплообменника.

Сигнал управления насосом поступает на вход драйвера электродвигателя, вырабатывающего напряжение $U_{\text{н}}$, подаваемое непосредственно на насос. Установившийся в теплообменнике расход теплоносителя $S_{\text{к}}$ будет определяться, во-первых, быстротой действия насоса $S_{\text{н}}$, а во-вторых — гидравлической проводимостью трубопроводов и охлаждаемого

объекта $q_{\text{а}}$, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$, и дросселя $q_{\text{д}}$. Средняя скорость движения теплоносителя будет также связана с вязкостью μ , которая, как известно, зависит от температуры. На рис. 3 приведена графическая зависимость кинематической вязкости воды в интервале температуры от 5 до 100 °C.

Результаты экспериментальных исследований показали, что при использовании в качестве теплоносителя дистиллированной воды и неизменном напряжении, подаваемом на электродвигатель насоса, увеличение температуры от 10 до 40 °C приводит к увеличению объемного расхода, измеряемого тахометрическим датчиком, более чем на 25 %.

Изменение расхода жидкости через теплообменник $S_{\text{к}}$ будет оказывать влияние на скорость протекания теплообменных процессов и определять транспортную задержку в процессах охлаждения и нагрева. Транспортная задержка является неизбежным следствием того, что между теплообменником и объектом присутствуют магистраль и накопитель, поэтому охлажденный теплоноситель достигает объекта лишь спустя некоторое время. Такие объекты управления известны в технике, и их в упрощенном виде удобно описывать в виде звена первого порядка с запаздыванием:

$$\Xi_{\text{хм}} \frac{dT_{\text{изм}}}{dt} + T_{\text{изм}} = KP_{\text{хм}}(t - \tau), \quad (2)$$

где $\Xi_{\text{хм}}$ — постоянная времени теплообменного аппарата холодильной машины, с; t — текущее время, с; $P_{\text{хм}}$ — мощность холодильной машины (входное воздействие), Вт; K — приведенный коэффициент передачи системы «холодильная машина – система транспортировки», °C/(Вт·с); τ — время запаздывания, характеризующее время транспортировки теплоносителя от теплообменного аппарата до датчика, с.

Помимо перечисленных входных и выходных воздействий, а также описанных внутренних взаимосвязей элементов структуры объекта управления, показанных на рис. 2, следует сказать о возмущающих воздействиях. Основным возмущением для прибора будет изменение потока тепла от охлаждаемого объекта $Q_{\text{об}}$, которое может быть связано с изменением режима его работы (или изменением температуры тела пациента, если прибор предназначен для охлаждения аппликатора в медицинских целях). Для любого типа холодильной машины важным фактором является температура окру-

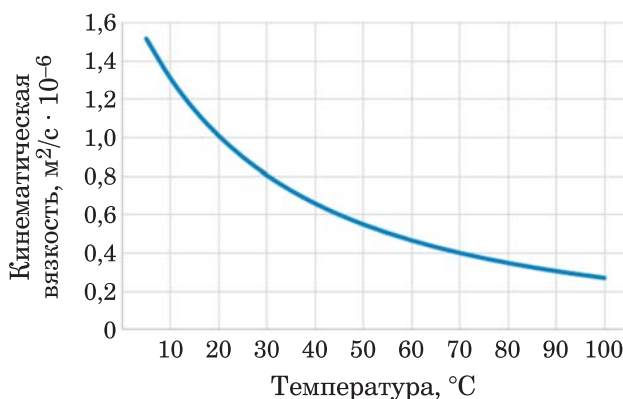


Рис. 3. Зависимость кинематической вязкости воды от температуры

жающей среды $T_{\text{окр}}$, изменение которой также необходимо рассматривать как возмущение. Тепловые потери в контуре движения теплоносителя обычно минимизируют путем установки теплоизоляции, однако в случае ее износа или повреждения потери увеличатся и эффективность охлаждения снизится. Еще одним возмущающим воздействием можно считать изменение проводимости трубопроводов и объекта (в медицинской технике это может быть связано с частичным пережатием гибких трубок или аппликатора).

Проведенный анализ показывает, что в процессе работы термоэлектрической холодильной машины необходимо контролировать температуру на горячей стороне термоэлектрической батареи и управлять сбросом тепла, компенсировать влияние возмущающих факторов, связанных с внешними тепловыми потоками, температурой окружающей среды и гидравлической проводимостью, а также учитывать наличие транспортной задержки в контуре перемещения теплоносителя и ее изменение, связанное с температурной зависимостью вязкости жидкости.

Построение системы управления термоэлектрической холодильной машиной

Очевидно, что температуру горячей стороны термоэлектрической батареи нужно поддерживать как можно более низкой для смещения рабочего перепада температур термоэле-

ментов батареи в область более низких значений. С другой стороны, при малой нагрузке на термоэлектрические модули (установившийся режим регулирования температуры теплоносителя, высокая уставка) частоту вращения вентиляторов целесообразно снижать для уменьшения уровня шума и расхода электроэнергии. Поэтому необходимо дополнить систему, показанную на рис. 2, каналом управления частотой вращения вентиляторов посредством драйвера электродвигателей, выдающего напряжение $U_{\text{в}}$, причем для регулирования частоты вращения необходимо использовать именно сигнал температуры радиатора $T_{\text{р}}$, что позволит воздействовать на величину $T_{\text{г}}$ (датчик температуры радиатора показан на рис. 1). В такой «активной» системе сброса тепла можно применять простое пропорциональное регулирование частоты вращения вентиляторов по сигналу с датчика температуры, так как задача стабилизации температуры горячей стороны не ставится.

Основным элементом системы управления безусловно является регулятор температуры жидкого теплоносителя, который должен обеспечить ее стабилизацию и апериодический характер переходных процессов, несмотря на наличие запаздывания в регулируемом объекте. Первые фундаментальные работы по теории управления объектами с запаздыванием были опубликованы в середине 1950-х годов Отто Смитом [10]. Регулятор, описанный в этих работах, сегодня известен как «упредитель», или



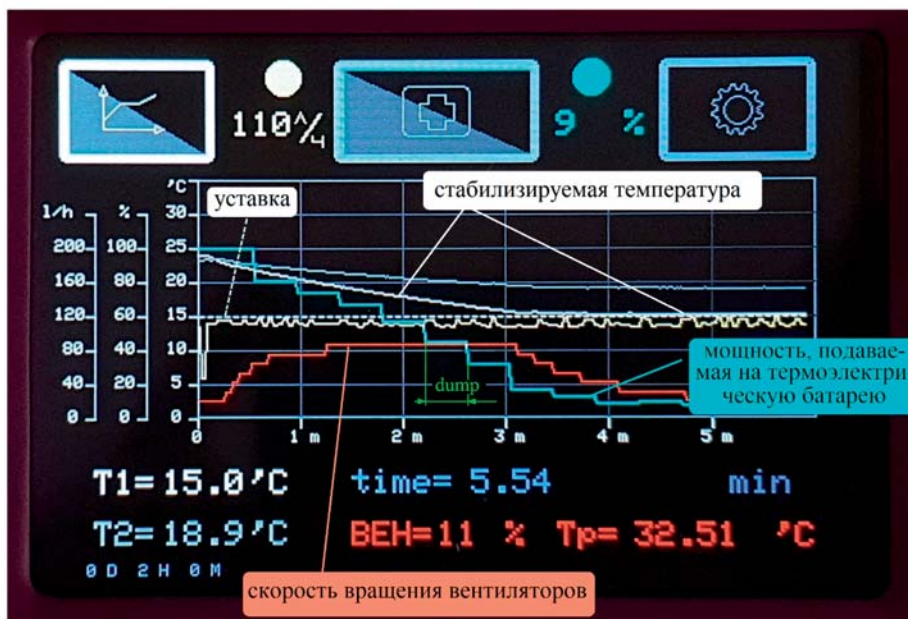
Рис. 4. Сравнение различных типов регуляторов для управления объектами с запаздыванием

```

if (dummy==0) { ← проверка условия обнуления периода квантования
err = TempMes-TempSet; ← вычисление рассогласования
derr=(err-errp)/(dummy*dt); ← вычисление производной по времени
от рассогласования
cryo=cryo+Ki*err+Kp*derr +Kd*(derr-derrp)/(dummy*dt); ← инкрементная форма
ПИД-регулятора
errp=err; ← запись переменной для хранения предыдущего
значения рассогласования
derrp=derr; ← запись переменной для хранения предыдущего
значения производной по времени от рассогласования
}
dummy=dummy+dt; ← счетчик шагов по времени
if (dummy>dump) {dummy=0;} ← обнуление периода квантования

```

а)



б)

Рис. 5. Фрагмент кода программы цифрового инкрементного ПИД-регулятора с увеличенным шагом квантования (а) и осциллограммы его работы, снятые на лабораторном макете термоэлектрической холодильной машины (б)

предиктор Смита. С тех пор было создано множество методов управления такими объектами (рис. 4), в том числе на основе применения цифровых регуляторов [11, 12].

Предиктивные и модальные регуляторы объединяет то, что для корректной работы системы нужна довольно точная модель объекта, которую не всегда удается получить, особенно если присутствует нелинейность процесса. Например, если вязкость теплоносителя сильно зависит от температуры, то и запаздывание будет изменяться, т.е. модель объекта нужно будет корректировать. В теории предиктивные и модальные регуляторы при наличии точной

модели и правильной настройки дадут более высокое качество регулирования [11, 12]. Однако при сложной структуре объекта управления, наличии нелинейных взаимосвязей и большого числа возмущающих воздействий это может обернуться более сложными структурой регулятора, методикой его настройки и потребует проведения дополнительных исследований.

Чтобы этого избежать, во многих случаях на практике отдают предпочтение установке стандартного цифрового ПИД-регулятора, а для корректной работы регулятора с объектом, характеризуемым транспортным запаздыванием

дыванием, и компенсации ошибки регулирования, связанной с задержкой с момента включения холодильной машины до достижения стационарной температуры в объекте, можно использовать простой метод, основанный на увеличении времени квантования. На рис. 5, а показан фрагмент кода программы, реализующий этот метод, а на рис. 5, б — осциллограммы, поясняющие его работу, снятые на разработанном макете прибора для охлаждения воды.

В приведенном фрагменте кода переменная *dumty* — это счетчик времени, а *dump* — настраиваемый период квантования. В созданном макете прибора базовое значение одного временного такта $dt = 1$ с, а значение *dump* регулируется и может составлять от 4 до 60 с в зависимости от уставки по температуре воды.

Выходной сигнал напряжения на термоэлектрической батарее (определяет мощность охлаждения) сохраняется в переменной *cruo*, перерасчет которой происходит каждый раз при обнулении *dumty*. В переменной *TempMes* хранится измеренное значение температуры, а в переменной *TempSet* — уставка. Рассогласование по температуре записывается со знаком «минус», так как идет процесс охлаждения, а не нагрев, и записывается в переменную *err*, производная по времени от рассогласования — в переменную *derr*.

Следует отметить, что в данной программе используется инкрементная форма ПИД-регулятора, т.е. в каждый момент времени, соответствующий шагу квантования, вычисляется приращение сигнала, и оно суммируется с предыдущим значением *cruo*. После расчета сигнала напряжения на термоэлектрической батарее происходит пересохранение значений *err* и *derr* в переменные *errr* и *derrr* для того, чтобы на следующем шаге квантования можно было вычислить необходимые производные.

Если выбрать значение *dump* слишком маленьким, то, поскольку имеется транспортное запаздывание, регулятор будет «забрасывать» мощность холодильной машины до максимального значения, а температура воды будет с задержкой снижаться до экстремально низких значений, после чего регулятор резко уменьшит мощность или вообще отключит холодильную машину. В таком случае температура вырастет до слишком высокого значения, и этот автоколебательный процесс будет повторяться. Если же выбрать *dump* чрезмерно

большим, то регулятор не будет реагировать на кратковременные возмущения, и может также вызывать перерегулирование из-за чрезмерного ожидания при неизменной мощности.

При попадании величины *dump* в рабочий интервал времени квантования регулятора формируются устойчивый апериодический процесс регулирования и стабилизация температуры. На рис. 5, б видно, что мощность, подаваемая на термоэлектрическую батарею, снижается со 100 % (для созданного макета прибора это соответствует мощности 240 Вт) до 9 % (текущее значение мощности отображается голубым цветом вверху экрана) (21,6 Вт) ступенчато с шагом квантования *dump*, который в данном случае составляет 24 с. При этом температура от 24 °С достигает уставки в 15 °С за время около 4 мин после чего стабилизируется. Величина шага *dump* в данном примере регулируется автоматически в соответствии с экспериментально полученным уравнением

$$dump = (TMax - TempSet) \cdot 2, \quad (3)$$

где *TMax* — переменная, в которую записывается предельное для прибора значение стабилизируемой температуры (в рассматриваемом случае это 27 °С).

При подстановке в выражение (3) *TMax* и *TempSet* в градусах Цельсия величина *dump* получается в секундах. Описанный подход позволяет учесть влияние вязкости на транспортную задержку путем адаптации шага квантования по времени по уставке температур и исключить возникновение автоколебательного режима регулирования.

Выводы

1. Проведен структурный анализ термоэлектрической холодильной машины как объекта управления. Показано, что величина теплового потока, отводимого батареями термоэлектрических элементов от теплоносителя, будет зависеть от температуры на горячей стороне батареи, объемного расхода жидкости и ее вязкости, обуславливающих транспортную задержку в замкнутом контуре, а также потока тепла от объекта, поэтому необходима стабилизация температуры теплоносителя и контроль температуры на горячей стороне батареи.

2. Обоснована необходимость «активного» управления сбросом тепла с горячей стороны

батареи термоэлектрических элементов по сигналу температуры радиатора для обеспечения энергетической эффективности работы холодильной машины.

3. Показано, что при наличии замкнутого контура перемещения теплоносителя объект управления может быть представлен в виде звена первого порядка с запаздыванием, а для устранения влияния запаздывания можно использовать предиктивные, модальные регуляторы, а также цифровые ПИД-регуляторы с настраиваемым шагом квантования по времени.

4. С помощью осциллограмм, полученных на разработанном макете термоэлектрической холодильной машины, показана работоспособность предложенного способа реализации ПИД-регулятора с настраиваемым шагом квантования по времени и показано, что при мощности источника питания батареи термоэлектрических элементов в 240 Вт удается понизить температуру воды от 24 °С до 15 °С за 4 мин и обеспечить аperiодический характер переходного процесса регулирования.

Список литературы

1. Белова, Е. М. Системы кондиционирования воздуха с чиллерами и фэнкойлами. Евроклимат / Е. М. Белова. — М.: Техносфера, 2006. — 412 с.
2. Han, K. Low-temperature properties of the ytterbium-doped fiber laser cooled by the thermoelectric cooler / K. Han, Z. Lou, X. Xi, W. Cui, C. Song // Optical Fiber Technology. 2022. — Vol. 73, 103036. DOI: 10.1016/j.yofte.2022.103036.
3. Cha, D. A. An experimental study of semiconductor process chiller using individual and dual compressor method / D. A. Cha, O. K. Kwon, M. D. Oh // International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration 2011, September, 19(03), 195 – 201, DOI: 10.1142/S2010132511000545
4. Гусейнов, Н. А. Влияние локальной аппаратной гипотермии на физиологические процессы организма / Н. А. Гусейнов, А. А. Хаммори, А. А. Мураев и др. // Вестник Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы. Серия: Медицина. — 2022. — Т. 26. — No. 3. — С. 243 – 258. DOI: 10.22363/2313-0245-2022-26-3-243-258.
5. Plekhanov, A. A. The Effect of Cryotherapy on Buccal Blood Vessels Evaluated by Optical Coherence Tomography Angiography: A Pilot Study / A. A. Plekhanov, N. A. Guseynov, E. V. Kiseleva et al // Journal of Biophotonics. — 2024. — September, DOI: 10.1002/jbio.202400318.
6. Булат, Л. П. Термоэлектрические охлаждающие устройства: Метод. указания для студентов спец. 070200 «Техника и физика низких температур» / Л. П. Булат, Е. В. Бузин. — СПб.: СПбГУНиПТ, 2001. — 41 с.
7. Кошкин, Н. Н. Холодильные машины: учебн. для вузов по специальности «Холодильные машины и установки» / Н. Н. Кошкин, И. А. Сакун, Е. М. Бамбушек и др. Под общ. ред. И. А. Сакуна. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. — 510 с.
8. Шостаковский, П. Г. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники / П. Г. Шостаковский // Компоненты и технологии. — 2009. — № 12. — С. 40 – 46.
9. Goldsmid, H. Julian. Introduction to Thermoelectricity / Goldsmid H. Julian. // Second Edition. Springer Series in Materials Science, 2016.
10. Smith, O. J. A controller to overcome dead time / O. J. Smith // ISA Journal. 1959. — Vol. 6. — Pp. 28–33.
11. Бобцов, А. А. Адаптивное и робастное управление с компенсацией неопределенностей. Учебное пособие / А. А. Бобцов, А. А. Пыркин. — СПб.: НИУИТМО, 2013. — 135 с.
12. Мазуров, В. М. Модальные регуляторы для промышленных объектов с запаздыванием / В. М. Мазуров, Фам Ван Нгуен. // Автоматизация в промышленности. — 2006. — № 11. — С. 19 – 22.

References

1. Belova E. M. *Sistemy konditsionirovaniya vozdukhа s chillerami i fenkoilami. Evroklimat* (Air conditioning systems with chillers and fan coils. Euroclimate), Moscow, Technosphere, 2006, 412 p.
2. Han K., Lou Z., Xi X., Cui W., Song C. Low-temperature properties of the ytterbium-doped fiber laser cooled by the thermoelectric cooler, *Optical Fiber Technology*, 2022, Vol. 73, p. 103036, [Electronic resource]. — DOI: 10.1016/j.yofte.2022.103036.
3. Cha D. A., Kwon O. K., Oh M. D. An experimental study of semiconductor process chiller using individual and dual compressor, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration* 2011, September, No. 19(03), pp. 195 – 201, DOI: 10.1142/S2010132511000545.
4. Guseinov N. A. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Meditsina* (RUDN Journal of Medicine), 2022, Vol. 26, No. 3, pp. 243 – 258, DOI: 10.22363/2313-0245-2022-26-3-243-258.
5. Plekhanov A. A., Guseynov N. A., Kiseleva E. V. The Effect of Cryotherapy on Buccal Blood Vessels Evaluated by Optical Coherence Tomography Angiography: A Pilot Study, *Journal of Biophotonics*, 2024, September, DOI: 10.1002/jbio.202400318.
6. Bulat L. P., Buzin E. V. *Termoelektricheskie okhlazhdayushchie ustroystva: Metod. ukazaniya dlya studentov spets. 070200 «Tekhnika i fizika nizkikh temperatur»* (Thermoelectric Cooling Devices: Methodical Instructions for Students of the Specialty 070200 «Low Temperature Engineering and Physics»), Saint Petersburg, SpbGUNiPT, 2001, 41 p.

7. **Koshkin N. N., Sakun I. A., Bambushe E. M.** *Kholodil'nye mashiny: uchebn. dlya vtuzov po spetsial'nosti «Kholodil'nye mashiny i ustanovki»* (Refrigeration machines: training for higher education institutions in the specialty «Refrigeration machines and installations»), Leningrad, Mechanical engineering, Leningrad branch, 1985, 510 p.
8. **Shostakovskii P. G.** *Komponenty i tekhnologii* (Components & Technologies), 2009, No. 12, pp. 40 – 46.
9. **Goldsmid H. J.** Introduction to Thermoelectricity, Second Edition, Springer Series in Materials Science, 2016.
10. **Smith O. J.** A controller to overcome dead time, ISA Journal, 1959, Vol. 6, pp. 28 – 33.
11. **Bobtsov A. A., Pyrkin A. A.** *Adaptivnoe i robastnoe upravlenie s kompensatsiei neopredelennosti. Uchebnoe posobie* (Adaptive and Robust Control with Uncertainty Compensation. Tutorial), Saint Petersburg, University ITMO, 2013, 135 p.
12. **Mazurov V. M.** *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* (Automation in Industry), 2006, No. 11, pp. 19 – 22.

RodiakinaRV@mpei.ru

Дата поступления 9.04.2025

Дата принятия к публикации 25.04.2025

On designing control systems for thermoelectric liquid coolers

Kozhechenko A. S., Shcherbakov A. V., Rodyakina R. V.

The relevance of introducing thermoelectric units for organizing cooling systems for industrial equipment, laboratory and medical equipment is due to the high reliability, compactness and environmental friendliness of refrigeration machines based on Peltier modules. It is shown that to create systems for controlling the temperature of liquid heat carriers in the case of using thermoelectric units, it is necessary to create a methodical approach and analyze the processes in the «cooling machine – heat exchange circuit» system. Based on the analysis, the need for automatic control of the heat removal mode from the «hot side» of the thermoelectric battery and the implementation of a temperature controller in the form of a digital PID controller with an increased quantization time was identified. The value of the specified quantization interval will be determined by the transport delay of the liquid transfer from the refrigerator to the object.

Keywords: thermoelectric cooling, Peltier effect, transport delay, PID controller, nonlinear object, digital control system.

CONTENTS

PROJECTS AND RESEARCH

Diudiakov A. A., Yanchenko S. A. A new control technique for hybrid harmonic filters	4
Grishin S. E., Anuchin A. S., Demidova G. L., Gorbunov N. M., Kulik E. S., Hao Chen. Determination of maximum power point of photovoltaic module for multi-channel string inverter using short circuit	11
Popov S. K., Valineeva A. A., Svistunov I. N. Simulation of heat-exchange in a drum reactor with indirect heating	20
Glazov V. S. Directions for improving the efficiency of high-temperature heat engineering installations	29

Arbatskiy A. A., Mechnik D. A., Gorelov M. V., Ankudinov A. S. Dependency study of ventilation systems' exhaust air rotary heat exchanger efficiency on its rotation speed	37
---	----

Chrtverikov A. E., Soldatov I. M., Khvostova M. S., Soldatov A. I. Analysis of characteristics and innovative solutions of small modular reactors cores	46
--	----

OPERATION, INSTALLATION AND ADJUSTMENT

Kozhechenko A. S., Shcherbakov A. V., Rodyakina R. V. On designing control systems for thermoelectric liquid coolers	57
---	----

Продолжается подписка на наш журнал на 2025 г.
 Оформить подписку можно через подписные агентства
 (подписной индекс 70734) или через редакцию.
 Возможна подписка на электронную версию журнала.

Главный редактор **С. А. ЦЫРУК**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

М. Г. Баширов, В. В. Вахнина, А. В. Волков, В. И. Гнатюк, А. О. Гольцев, И. Д. Грачев, Н. Ф. Джагаров (Болгария), **Е. Н. Касьянова** (ответственный секретарь), **Ю. В. Матюнина, И. И. Надтока, А. Н. Пехота** (Республика Беларусь), **С. К. Попов** (зам. гл. редактора по теплоэнергетике), **Е. Н. Рыжкова** (зам. гл. редактора по электроэнергетике), **Ю. А. Сычев, В. Э. Фризен, Н. Д. Чичирова, К. Ф. Шарафеддин** (Ливан), **А. В. Щербаков, С. А. Янченко**

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Перепечатка, копирование материалов, опубликованных в журнале «Промышленная энергетика», допускаются только с разрешения редакции

Адрес редакции: 129090, Москва, ул. Щепкина, д. 8.

Телефон: (495) 234-74-49.

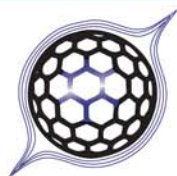
[Http://www.promen.energy-journals.ru](http://www.promen.energy-journals.ru); E-mail: prom_energy@rambler.ru; prom_energy1@mail.ru

Сдано в набор 10.06.2025. Подписано в печать 20.06.2025. Дата выхода в свет 23.06.2025. Формат 60 × 84 1/8. Печ. л. 4,0. Тираж 2500 экз. Заказ БЛ-1398. Цена — свободная.

Адрес для переписки: АО НТФ «Энергопрогресс»: 129090, Москва, ул. Щепкина, д. 8

Оригинал-макет выполнен в издательстве «ФОЛИУМ»
 127411, Москва, Дмитровское ш., 157, тел.: (499) 258-08-28. E-mail: info@folium.ru

Типография издательского дома «ФОЛИУМ»



научно-техническая фирма
Энергопрогресс
www.energy-journals.ru

129090, Москва, ул. Щепкина, д. 8
Тел./факс: +7 (495) 911-2696, 911-7430
Банковские реквизиты:
ИНН 7705784276, КПП 770201001,
ПАО Сбербанк г. Москва, БИК 044525225,
к/с 30101810400000000225, р/с 40702810438120110669

АО «НТФ «Энергопрогресс» осуществляет подписку на следующие издания на II полугодие 2025 года. Подписаться можно непосредственно через редакцию с любого номера журнала и на любой период по редакционным ценам с учётом почтовых расходов и НДС

ЭНЕРГЕТИК ISSN 0013-7278

Выходит с июня 1928 года 12 раз в год. Цена за номер – **2574 руб.**

www.energetik.energy-journals.ru

Подписные индексы: **71108** (pressa-rf.ru); **П1330** (podpiska.pochta.ru).



Приложения к журналу «ЭНЕРГЕТИК»



БИБЛИОТЕЧКА ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ISSN 2949-5989

Выходит с июня 1998 года 12 раз в год.

Цена за номер – **1661 руб.**

Подписные индексы: **88983** (pressa-rf.ru);

П7490 (podpiska.pochta.ru).



ЭНЕРГЕТИКА ЗА РУБЕЖОМ

Выходит с июня 2000 года 6 раз в год.

Цена за номер – **1276 руб.**

Подписные индексы: **87261** (pressa-rf.ru);

П7491 (podpiska.pochta.ru).



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ ISSN 0201-4564

Выходит с 1930 года 12 раз в год. Цена за номер – **2772 руб.**

www.elst.energy-journals.ru

Подписные индексы: **71104** (pressa-rf.ru); **П1353** (podpiska.pochta.ru).

**журналу
95 лет**

Приложение к журналу «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВО ЗА РУБЕЖОМ ISSN 0421-188X

Выходит с января 1956 года 6 раз в год. Цена за номер – **1375 руб.**

Подписные индексы: **88015** (pressa-rf.ru); **П7489** (podpiska.pochta.ru).

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО ISSN 0016-9714

Выходит с 1930 года 12 раз в год. Цена за номер – **2398 руб.**

www.gts.energy-journals.ru

Подписные индексы: **70224** (pressa-rf.ru); **П1354** (podpiska.pochta.ru).



ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА ISSN 0033-1155

Выходит с августа 1944 года 12 раз в год. Цена за номер – **2739 руб.**

www.promen.energy-journals.ru

Подписные индексы: **70734** (pressa-rf.ru); **П1356** (podpiska.pochta.ru).

ВЕСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ ISSN 2218-5496

Выходит с сентября 2002 года 6 раз в год. Цена за номер – **2761 руб.**

www.vesti.energy-journals.ru

Подписные индексы: **87667** (pressa-rf.ru); **П1357** (podpiska.pochta.ru).



XXIX БЕЛОРУССКИЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ и
ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ФОРУМ

ENERGY EXPO

energyexpo.by

green
industry

e
trans

oil & gas
technologies

ATOMEXPO
Belarus

exp--light

water & air
technologies

 eCity

7-10 октября

Минск
Беларусь 2025

Минск, пр. Победителей, 20/2