

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

---

**ЭНЕРГЕТИКА.  
ТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО**

---

2-я НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
СТУДЕНТОВ

19 – 21 ноября 2019 г.

**СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ**

Москва  
Издательство МЭИ  
2019

Энергетика. Технологии будущего: 2-я Науч.-техн. конф. студентов (19 – 21 ноября 2019 г., Москва): Тез. докл. М.: Издательство МЭИ, 2019. – с.

ISBN

Тезисы докладов студентов, помещенные в настоящий сборник, отражают их исследования в рамках Программы научных исследований «Энергетика» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» на 2019-2024 годы, проводимые в период после окончания 1-й Научно-технической конференции (28-29 мая 2019 г.) до 15 октября 2019 г.

Данные тезисы охватывают некоторые из разрабатываемых в НИУ «МЭИ» передовых энергетических технологий в следующих областях: газовая и угольная генерация; атомная энергетика; ветро-, гидро-, петротермальная и солнечная генерация, гибридные энергокомплексы; распределенная генерация; передача электрической энергии; конечное потребление энергии; аккумулирование энергии; цифровизация электроэнергетики, а также технологии индустрии 4.0.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов, преподавателей вузов и инженеров, интересующихся указанными выше направлениями науки и техники.

В отдельных случаях в авторские оригиналы внесены изменения технического характера. Как правило, сохранена авторская редакция.

---

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

<b>Рогалев Н.Д.</b>	- ректор МЭИ, председатель;
<b>Драгунов В.К.</b>	- проректор по научной работе, со-председатель;
<b>Комаров И.И.</b>	- к.т.н., директор ЦИР, со-председатель, ответственный за проведение конференции;
<b>Кролин А.А.</b>	- к.э.н., начальник ОКИПП ЦИР – ответственный секретарь;
<b>Аникеев А.В.</b>	- к.т.н., и.о. заведующего кафедрой АЭС;
<b>Волков А.В.</b>	- д.т.н., заведующий кафедрой ГГМ;
<b>Маленков А.С.</b>	- к.т.н., начальник ОИРР ЦИР;
<b>Насыров Р.Р.</b>	- к.т.н., доцент кафедры ЭЭС
<b>Орлов К.А.</b>	- к.т.н., заведующий кафедрой ТОТ;
<b>Рыженков А.В.</b>	- д.т.н., директор НИО НЦ «Износостойкость»;
<b>Тульский В.Н.</b>	- к.т.н., директор ИЭЭ;
<b>Тягунов М.Г.</b>	- д.т.н., профессор кафедры ГВИЭ

## СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. Большая энергетика. Газовая и угольная генерация .....	4
Секция 2. Атомная энергетика .....	13
Секция 3. ВИЭ (гибридные энергетические комплексы, мини-ГЭС) .....	18
Секция 4. Распределенная генерация .....	30
Секция 5. Передача электрической энергии .....	43
Секция 6. Конечное потребление энергии .....	47
Секция 7. Аккумуляция энергии .....	52
Секция 8. Цифровизация электроэнергетики .....	57
Секция 9. Технологии индустрии 4.0 .....	61

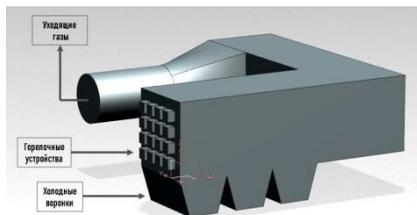
## **Секция 1**

**Большая энергетика. Газовая и угольная генерация**

научный руководитель –  
директор ЦИР, к.т.н. **И.И. Комаров**

*К.В. Бабушкина, студ.; рук. В.П. Соколов, д.т.н., проф.,  
конс. И.И. Комаров, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

## РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА НА УСКП ПАРА С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОМПОНОВКОЙ



**Рис. 1. Конструктивный облик котла горизонтальной компоновки**

Проблема, решаемая в рамках данного проекта, заключается в повышении эффективности и экологичности энергетического оборудования, достижении нового технологического уровня российской теплоэнергетики путём перехода к ultrasверхкритическим параметрам (УСКП) пара – 710/710°C; 35 МПа [1].

Применение высокотемпературного перегрева пара приводит к изменению структуры металлотрат – возрастает массовая доля дорогостоящих жаропрочных аустенитных сталей и никелевых сплавов. Одним из способов уменьшения стоимости котельного агрегата является сокращение протяженности трубопроводов свежего пара и пара промежуточного перегрева, которые изготавливаются из дорогостоящих жаропрочных материалов на никелевой основе. Для снижения стоимости энергоблока с УСКП пара была разработана новая компоновка, предполагающая размещение котельного агрегата горизонтально в непосредственной близости от паровой турбины [2]. При переходе к горизонтальной компоновке предлагается организовать сжигание топлива в короткофакельных вихревых горелочных устройствах, расположенных на торцевой стенке котла.

В результате теплового расчета были получены основные теплотехнические характеристики котельного агрегата, определен коэффициент полезного действия (КПД) – 91,6%. Полная тепловая мощность – 1100 МВт, электрическая мощность энергоблока 600 МВт. В качестве топлива был выбран кузнецкий каменный уголь марки Д.

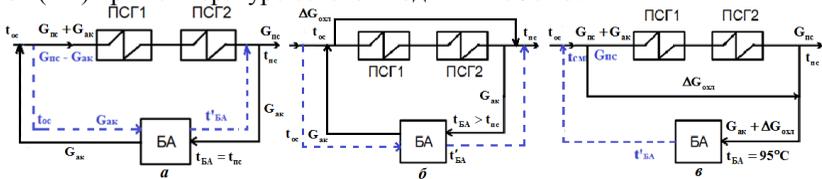
### Литература

1. **Зарянкин А. Е.**, Роголёв А. Н., Сойко Г. В. Возможные пути перехода к высокотемпературным паротурбинным установкам //Естественные и технические науки. – 2013. – №. 5. – С. 228-233.
2. **Н.Д. Роголёв**, В.Б. Прохоров, А.Н. Роголёв, И.И. Комаров, А.А. Кочерова, Д.М. Ростова. Перспективные конструктивные решения паровых котлов для энергоблоков с ultrasверхкритическими параметрами //Конференция уголь-ЭКО. – 2016. – С. 111-120.

*Д.И. Захарова, студ.; рук. Е.Т. Ильин, к.т.н., доц. («НИУ «МЭИ»*  
**ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ АККУМУЛЯТОРОВ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Тепловые аккумуляторы горячей воды достаточно широко используются в системах централизованного теплоснабжения для расширения регулировочного диапазона ТЭЦ. Чаще всего для этих целей используют баки-аккумуляторы (БА) атмосферного типа с температурой запасаемой горячей воды около 95°C. При повышении температуры запасаемой воды необходимо изготавливать баки на повышенное давление, с резким увеличением их металлоемкости, стоимости и снижением надежности работы. Следует отметить, что работа теплофикационных турбин и связанных с ними аккумуляторов горячей воды существенно зависит от температуры прямой сетевой воды за сетевыми подогревателями, которая может меняться от 70 до 120°C. Для обеспечения устойчивого использования аккумулятора в течение всего года были разработаны технологические схемы включения систем аккумулирования, в общую схему отпуска тепла от ТЭЦ, представленные на рис. 1.

Первая схема (рис.1, а) подразумевает аккумулирование теплоносителя с параметрами прямой сетевой воды ( $t_{БА} = t_{ПС}$ ), согласно температурному графику теплосети. Вторая схема (рис.1, б) обеспечивает аккумулирование воды с большей температурой, чем по температурному графику теплосети ( $t_{БА} > t_{ПС}$ ). Третья схема (рис.1, в) позволяет эксплуатацию баков аккумуляторов (БА) при температуре сетевой воды выше 95°C.



**Рисунок 1 – Технологическая схема включения БА в действующую теплофикационную установку: а – при  $t_{БА} = t_{ПС}$ ; б – при  $t_{БА} > t_{ПС}$ ; в – при  $t_{БА} \leq 95^\circ\text{C}$**

На основании расчетных исследований определены показатели тепловой экономичности ТЭЦ при разных условиях эксплуатации, выбрана оптимальная технологическая схема и конструкция БА. Проведенная оценка экономической эффективности аккумулирования, показала целесообразность ее применения при разных условиях эксплуатации.

**Литература**

1. Гоглиб А.И. О возможном расширении регулировочного диапазона электрической мощности теплофикационной турбины типа Т с использованием баков-аккумуляторов сетевой воды: Реферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.14. — Алма-Ата, 1991. — 20 с.

*С.С. Зими́на, студ.; рук. И.А. Милу́ков, к.т.н., доц.;  
конс. В.О. Киндра (НИУ «МЭИ»)*

## **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ С ЦЕЛЬЮ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ НА ПАРОТУРБИННЫХ ТЭЦ**

Суточная неравномерность графиков электрической и тепловой нагрузок при когенерации накладывает требования по маневренности для генерирующих объектов. Для расширения регулировочного диапазона паротурбинной ТЭЦ можно использовать аккумуляторы энергии [1].

В работе проведено исследование влияния тепловых аккумуляторов на режимы работы паротурбинного теплофикационного энергоблока с установленной электрической и тепловой мощностью, равной 6 МВт и 24 Гкал/час, соответственно. По результатам расчетов показателей ТЭЦ при прохождении суточного графика нагрузки в зимний период времени для температурного графика теплосети 150/70 установлена максимальная мощность теплового аккумулятора для энергоблока с турбиной П-6-35/5, равная 81 МВт·ч. Объем запасаемой сетевой воды не превышает 1775 м<sup>3</sup> при температуре запасаемой сетевой воды, равной 150°С и давлении сети, равном 5 бар.

В дальнейших исследованиях планируется провести конструкторский расчет аккумулятора сетевой воды с целью формирования его геометрических характеристик и осуществления выбора материалов для изготовления, базируясь на стандартах для сосудов под давлением. Во избежание коррозии верхней части корпуса и конструкции крыши теплового аккумулятора будет поддерживаться неактивная атмосфера в виде паровой или азотной подушки [2].

### **Литература**

1. **S. Magnania**, L. Pezzolaa, P.Dantia. Design optimization of a heat thermal storage coupled with a microCHP for a residential case study // *Energy Procedia* 101 - 2016 P. 830-837.
2. **Бекман Г.**, Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии: пер. с англ. / Г. Бекман Г., П. Гилли // Под ред. В.М. Бродянского. – М.: Мир, 1987 – 272 с.

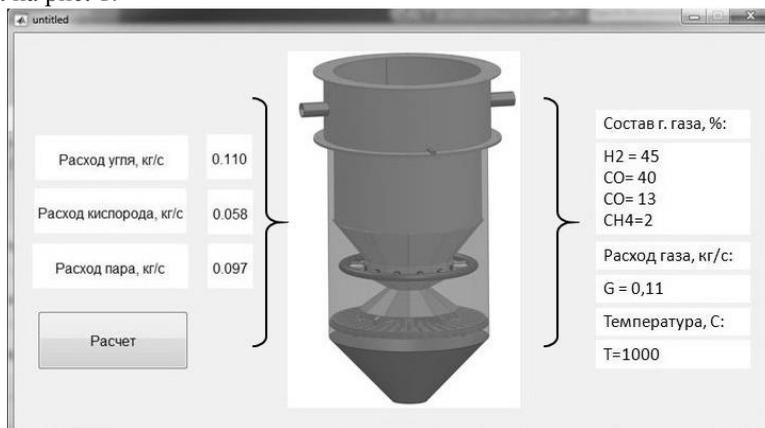
*Д.А. Каранова, студ.; рук. И.И. Комаров, к.т.н.;  
конс. А.С. Маленков, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ГАЗИФИКАЦИЕЙ УГЛЯ НА БАЗЕ ТОТЭ И ГТУ

Рассматриваемая технология является альтернативой неэффективному вследствие низкой калорийности топлива способу прямого сжигания низкосортного угля. Особенностью является использование генераторного газа от газификатора в твердооксидном топливном элементе (ТОТЭ), при этом уходящие горячие газы от ТОТЭ утилизируются далее в газовой турбине (ГТ).

Расчеты технологической схемы показали, что для выработки 1 МВт электрической мощности в ТОТЭ необходимо производить около 840 кг/ч генераторного газа, а мощность ГТ при этом составит 0,5 МВт. Объединение ТОТЭ совместно с ГТ позволяет достичь повышения совокупного электрического КПД комплекса до 57%.

Для моделирования поведения данной установки при изменении внешних параметров её работы будет разработана имитационная модель технологической схемы, написанная на языке Matlab. Модель будет реализована в виде независимого программного обеспечения, позволяющего определить оптимальные режимные параметры комплекса. На данный момент разработана имитационная модель газификатора и прорабатывается графический интерфейс пользователя, часть интерфейса программы представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Интерфейс программы**

*П.Г.Кодолова, студ.; рук. А.В.Бурмакина, к.т.н.;  
конс. И.И. Комаров, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СИНТЕЗ-МЕТАНА

На территории России имеются огромные запасы угля, большая часть которых сосредоточена в восточной части страны (82%). Технологии прямого сжигания угля сопряжены со значительным вредным воздействием на окружающую среду. В этом случае в атмосферу выбрасываются оксиды серы и зольные частицы. Из угля может быть получен природный газ, использование которого лишено указанных проблем. Для этого предлагается технологический комплекс, включающий два основных процесса: парокислородная газификация угля с последующем получением на его основе синтез-метана по методу синтеза Фишера-Тропша (рис.1). Результатом внедрения технологического комплекса станет увеличение доли угля в структуре топливно-энергетического баланса и увеличение объемов доступных для внутреннего потребления и экспорта высококачественного природного газа в восточной части РФ [1].

Основным элементом схемы является газификатор и реактор метанирования. Для расчета газификации был выбран Канско-Ачинский угольный бассейн. Парокислородный окислитель имеет расход водяного пара 0,7 кг/ч (1 кг/ч угля),  $T_{\text{пар}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ . Кислород подается с  $\alpha = 0,3$ . Расходы пара и кислорода подобраны из условия обеспечения необходимого массового соотношения  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  в генераторном газе, равного 0,21.

Требования к реактору Фишера-Тропша включают в себя: состав катализатора в реакторе 78% Ni и 23 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , температура и давление реакции  $325^\circ\text{C}$  и 0,3 МПа. Выполнение данных требований обеспечивает максимальный выход  $\text{CH}_4$  из реактора метанирования.

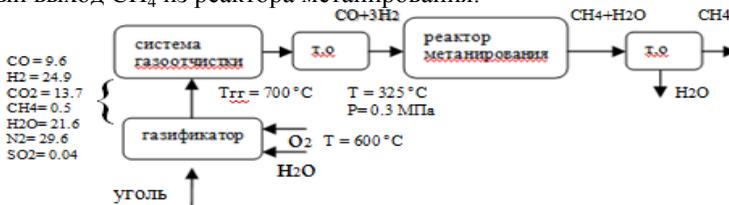


Рис.1. Процесс производства синтез-метана

### Литература

1.Мордкович В.З., Синева Л.В., Кульчаковская Е.В., Асалиева Е.Ю. Четыре поколения технологии получения синтетического жидкого топлива на основе синтеза Фишера-Тропша// Катализы в промышленности. – 2015. – №. 5. – С. 23-45



*М.С. Постникова, студ.; рук. А.Е. Зарянкин, д.т.н. проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЕДИНИЧНЫХ МОЩНОСТЕЙ ПАРОТУРБИННЫХ БЛОКОВ И ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК**

На данный момент мощность утилизационной одновальной ПГУ ограничивается мощностью ГТУ. Даже при рассмотрении самой мощной из современных ГТУ, а именно газотурбинной установки фирмы Siemens SGT5-9000HL с температурой перед газовой турбиной 1670°C, которая находится в разработке, можно получить максимальную мощность утилизационной ГТУ 870 МВт.

Дальнейшее увеличение мощности ГТУ ограничивается с точки зрения надежности, и в ближайшем будущем стремительного роста мощности ГТУ ожидать не приходится.

В ходе данного исследования были рассмотрены следующие способы повышения единичной мощности.

Первый из них - переход к гибридной ПГУ с дополнительным котлом (ПГУ с параллельной схемой). При такой тепловой схеме возможно увеличить мощность в 1,8-2 раза, главной в установке является ПТУ, поскольку именно она будет иметь больший КПД, и её мощность может составлять 2/3 мощности ПГУ. При этом КПД её увеличивается незначительно, что связано со снижением степени бинарности, но при этом достигается экономия топлива в сравнении с ПТУ такой же мощности. В работе рассмотрена схема параллельной ПГУ с паротурбинным приводом компрессора, что позволит сделать ротор, на котором расположены паровая турбина и компрессор, с частотой вращения, отличной от частоты вращения газовой турбины.

Следующим путём увеличения мощности ПГУ, предлагается создание двухпоточных компрессоров и газовых турбин. Такие установки позволят поднять мощность ПГУ в 2 раза, но при этом мы сталкиваемся с такими трудностями, как усложнение и удорожание конструкции.

Этими путями потенциал увеличения мощности ПГУ оказывается практически исчерпан. В этой связи предлагается рассмотреть переход к альтернативному, принципиально новому, сдвоенному циклу Ренкина, где вводится третий (на основном блоке) высокотемпературный перегрев пара после ЦСД основной турбины, обеспечивающий работу присоединенного паротурбинного блока. При этом суммарная мощность такой установки увеличивается на 27%, а её КПД составляет 52,4%.

Важно отметить, что предлагаемая энергетическая установка может быть реализована на базе существующих технологий с использованием существующих блоков в качестве основной турбины.

*В.В. Чурмакова, студ.; А.Б. Тхабисимов, к.т.н.;  
рук. А.Ф. Медников к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АБРАЗИВНОЙ СТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ 15X11МФ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Одним из перспективных пассивных способов борьбы с абразивным износом в условиях эксплуатации первых ступеней проектируемых турбин, рассчитанных на ультравысокотемпературные параметры пара, может являться развитие и реализация технологий диффузионного одно- и многокомпонентного насыщения металлами и неметаллами защищаемой поверхности с использованием ионно-плазменных технологий их формирования в вакууме. Возможным способом защиты может являться процесс диффузионного насыщения поверхности ионами азота [1]. Такой тип модификации поверхности зарекомендовал себя на этапе экспериментальных исследований в рамках решения задачи повышения стойкости лопаточных сталей к каплеударной эрозии [2].

Экспериментальные исследования абразивной стойкости лопаточной стали 15X11МФ с модифицированной поверхностью были выполнены согласно стандарту ASTM G76-13 с использованием экспериментального стенда НИУ «МЭИ». Исследования проводились для образцов стали 15X11МФ с различной глубиной модификации (2 типа) поверхности при различных углах атаки (30° и 90°) абразивных частиц (электрокорунда  $Al_2O_3$ ), находящихся в воздушно-абразивном потоке, движущемся со скоростью 170 м/с, при одинаковой концентрации частиц и температуре окружающей среды (25°C).

Полученные кинетические кривые абразивного износа для обоих типов модификации при различных углах атаки воздушно-абразивного потока показали увеличение абразивной стойкости не менее, чем на 20%, по сравнению с незащищенной поверхностью, что свидетельствует о возможности применения выбранного для исследований типа упрочнения при условии соблюдения выявленной закономерности на этапе дальнейших исследований при повышенных температурах испытаний.

### **Литература**

1. **Kachalin G.V.**, Mednikov A.F., Tkhabisimov A.B., Zhukova E.A. State-of-the-art, problems and methods to improve erosion resistance of materials used for manufacturing of turbines // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, 2016, Vol. 7 (5), pp. 955-963.
2. **Дасаев М.Р.**, Тхабисимов А.Б., Медников А.Ф. Экспериментальные исследования процесса каплеударной эрозии лопаточных сталей с модифицированной поверхностью // 23 МНТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез.докл.», 2017, Т.3, С. 251.

## **Секция 2**

### **Атомная энергетика**

научный руководитель –  
и.о. заведующего кафедрой АЭС, к.т.н.

**А.В. Аникеев**

*З.А. Заклецкий, студ.; рук. В.П.Будаев, д.ф-м.н. (НИУ «МЭИ»)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ ПОСЛЕ МОЩНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

При длительном экспонировании тугоплавких материалов под действием мощных потоков высокотемпературной плазмы обнаружены эффекты формирования высоко развитой наноструктурированной поверхности [1].

Развитая поверхность оказывает влияние на решеточные и электронные подсистемы наночастиц, изменяя их реакционную способность, электрические, магнитные, тепловые, эмиссионные, оптические и другие свойства.

Для получения наноструктурированных материалов в НИУ «МЭИ» сооружена экспериментальная установка ПЛМ (Плазменный Линейный Мультикас) с параметрами плазмы, характерными для пристеночной плазмы экспериментальных термоядерных реакторов [2].

В работе приведен анализ экспериментальных данных, полученных при обработке поверхности тугоплавких материалов (вольфрам, титан, молибден), на основе результатов сканирующей электронной микроскопии и спектроскопических измерений. Приведена методика для получения двух типов наноструктурированной вольфрамовой поверхности в плазменном разряде ПЛМ.

Разработан экспериментальный узел для измерения в установке ПЛМ термо-автоэмиссионных свойств образцов с модифицированной наноструктурированной поверхностью типа «пух». Для вольфрама ожидается увеличение эмиссионной способности за счет повышенного коэффициента усиления электрического поля на неоднородностях модифицированной поверхности более, чем на 30 %.

### Литература

1. **Будаев В.П.** Результаты испытаний вольфрамовых мишеней дивертора при мощных плазменно-тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР и токамаках реакторного масштаба. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 4, с. 5-31.
2. **Будаев В.П.,** Федорович С.Д., Лукашевский М.В., Мартыненко Ю.В., Плазменная установка НИУ «МЭИ» для испытаний тугоплавких металлов и создания высокопористых материалов нового поколения. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 3, с. 23-36.

*С.Ю. Капустин, студ.; рук-ли Г.В. Качалин, к.т.н.;*

*А.В. Аникеев, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ДИФФУЗИОННОЕ НАСЫЩЕНИЕ ЛОПАТОЧНОЙ СТАЛИ 15X11МФ АЗОТОМ**

По результатам анализа современной научно-технической литературы по проблеме износа рабочих лопаток паровых турбин АЭС были сделаны важные выводы. Во-первых, ударная волна от капли проникает в поверхностный слой металла и приводит к его разупрочнению, следовательно, необходимо рассматривать методы упрочнения поверхностного слоя, а не простое нанесение покрытия. Во-вторых, для упрочнения поверхностного слоя металла хорошо подходят диффузионные покрытия. В результате анализа различных видов диффузионных покрытий были выбраны наиболее подходящие для решения поставленной задачи. Среди них – ионное азотирование.

Одним из главных преимуществ метода ионного азотирования является относительно низкая температура обработки, за счет этого возможно диффузионное насыщение поверхности сталей без изменения первоначальной структуры и механических свойств.

Ионное азотирование образцов из стали 15X11МФ было реализовано с помощью установки вакуумного магнетронного напыления «Гефест+».

Азотирование проводилось при следующих параметрах: давление в камере 0,31 Па; расход аргона 11 нл/ч; расход азота 10,8 нл/ч; параметры магнетронного разряда: 280÷320 V, 2,7÷3,0 A; напряжение на образцах 980 V.

После ионного азотирования изучались характеристики диффузионного слоя, такие как: глубина, микротвердость, шероховатость, эрозийная и коррозионная стойкость.

*Д.Б. Куроптев, студ.; рук. А.Е. Зарянкин, д.т.н., проф.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **УЛЬТРАСВЕРХВЫСОКИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПАРОТУРБИННОМ СТРОЕНИИ**

Как известно, КПД паротурбинного цикла зависит от начальных и конечных параметров пара. Повышая температуру и давление на входе в турбину, можно увеличить экономичность энергоблока. Поэтому увеличение начальных параметров пара энергоблока, безусловно, является актуальной проблемой энергетики.

В настоящее время в мире достигнуты следующие параметры энергоносителя: начальное давление 30 МПа и температура 650°C. Ведутся разработки паровых турбин, у которых на входе давление пара составит 35 МПа, а температура 700°C. Проблема состоит в том, что при достижении указанных параметров пара из последней ступени конденсационной турбины выходит сухой насыщенный пар, и дальнейшее повышение начальной температуры пара не приведет к увеличению КПД паротурбинного цикла, поскольку избыточная тепловая энергия перегретого пара, покидающего последнюю ступень конденсационной турбины, повышает суммарный расход теплоты без производства полезной работы.

Для решения указанной проблемы предлагается новый термодинамический цикл. В представленном цикле два паротурбинных блока: основной и утилизационный. Основная турбина имеет на входе температуру 1500°C и давление 35 МПа. Однако пар после ЦСД основной турбины идет не в цилиндр низкого давления, а в котёл-утилизатор второй (утилизационной) турбины, тем самым он охлаждается до температуры 250°C, то есть температуры перед ЦНД существующих блоков СКД, работающих в области влажного пара.

Проделанный детальный расчёт рассматриваемой тепловой схемы высокотемпературной паро-паровой энергетической установки, работающей по двоянному циклу Ренкина, показал, что при указанных начальных параметрах пара КПД предлагаемого цикла достигает 60%, что превышает эффективность существующих энергоблоков УСКД.

Таким образом, при работе энергоблока по предложенной тепловой схеме решается проблема перехода к паротурбинным блокам, работающих при ультрасверхвысоких начальных параметрах пара с КПД на уровне современных трехконтурных ПГУ.

*Н.М. Григорьев, студ.; рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **КОНЦЕПЦИЯ НОВОЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ДЛЯ АЭС С ВВЭР-СКД**

Стратегическим направлением развития атомной энергетики России является создание реакторов IV поколения, в том числе водоохлаждаемого реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя (ВВЭР-СКД).

Переход к сверхкритическим параметрам пара на АЭС требует решения ряда принципиальных научных и технологических проблем, которые связаны не только с разработкой реакторной установки IV поколения, а также паротурбинной части.

При переходе к сверхкритическому давлению для уменьшения конечной влажности пара в последних степенях паровой турбины используется промежуточный перегрев пара, осуществление которого в реакторной установке представляет определенные трудности.

Проведенные расчеты принципиальной тепловой схемы энергоблока [1] мощностью 1200 МВт с начальными параметрами пара  $p_0=24$  МПа и  $t_0=540^\circ\text{C}$  показали, что, как и в традиционных блоках АЭС, оптимальным является использование сепарации и двухступенчатого перегрева пара. Температура пара после промежуточного перегрева была принята равной  $t_{\text{пр}}=480^\circ\text{C}$ , а оптимальное разделительное давление при этом составило 0,56 МПа.

Повышение эффективности энергоблока связано не только с повышением начальных параметров пара и оптимизацией тепловой схемы, но с использованием паротурбинных установок, имеющих совершенную проточную часть.

Проработка концепции мощной паровой турбины для АЭС в ВВЭР-СКД показала, что она будет иметь свои отличительные особенности. Во-первых, в отличие от турбин АЭС такая турбина должна быть только быстроходной, т.к. большая часть процесса расширения располагается в области перегретого пара. Во-вторых, виду «нетрадиционного» для турбоустановок АЭС места расположения сепаратора-пароперегревателя (между ЦСД и ЦНД), а для турбоустановок ТЭС значения давления перегретого пара, необходима разработка новых конструкций ЦСД и ЦНД.

Разработаны конструкции ЦСД и ЦНД для двух вариантов высот рабочих лопатки последней ступени 1200 мм и 1400 мм. Если в первом варианте число ЦНД составило три, то во втором варианте их количество уменьшается до двух.

### **Литература**

1. **Абдулкадыров В.М.**, Богословская Г.П., Грабежная В.А. Термодинамические циклы АЭС, работающих на сверхкритических параметрах воды // Ядерная энергетика. Известия вузов, вып. №4, 2012. – С. 85-91.

## **Секция 3**

### **ВИЭ (Гибридные энергетические комплексы, мини-ГЭС)**

научный руководитель –  
д.т.н., профессор **М.Г. Тягунов**

*Р.П. Шевурдиев, студ.; рук. М.Г. Тягунов, д.т.н., проф.  
(НИУ «МЭИ»)*

## ГИБРИДНЫЙ ЭНЕРГОКОМПЛЕКС ГАРАНТИРОВАННОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С ВОДОРОДНЫМ АККУМУЛИРОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ

Одним из способов повышения энергетической эффективности систем децентрализованного энергоснабжения является внедрение гибридных комплексов гарантированного энергоснабжения (далее – ГЭК) с использованием возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ).

На рис. 1 приведена структурная схема предлагаемого ГЭК, представляющая собой систему энергоустановок, функционирующих на основе ВИЭ – фотоэлектрическая установка, ветроэнергетическая установка, гидроэнергетическая установка, теплонасосная энергетическая установка, электродвигатель, солнечная система теплоснабжения, водородный накопитель электрической энергии (ВНЭЭ), тепловой аккумулятор, потребитель электрической и тепловой энергии.

Важным элементом в схеме, обеспечивающим надежность ГЭК, является ВНЭЭ, поскольку мощность, генерируемая установками ВИЭ, крайне изменчива во времени.

В работе определены свойства и особенности функционирования установок ВИЭ в составе ГЭК и требования, предъявляемые к накопителям. Установлено, что для соответствия требованиям ГЭК, кроме ВНЭЭ, которые можно рассматривать как источники энергии в виду их высокой энергоемкости, необходимы промежуточные накопители, обладающие свойствами суперконденсатора в режимах приема и отдачи импульсов мощности на секундных интервалах времени. В состав отдельных генерирующих установок ГЭК включаются турбины и генераторы различного типа и конструкции, выбор которых зависит от условий их использования.

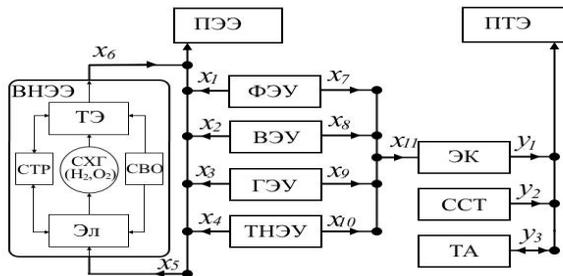


Рис. 1 Структурная схема гибридного энергокомплекса:  $x_1-x_{11}$  – потоки электрической энергии;  $y_1-y_3$  – потоки тепловой энергии

*А.А. Федотов, Л.В. Серебриников, студенты; рук. Н.В. Кулешов, д.т.н.,  
проф.(НИУ «МЭИ»)*

## ХРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В настоящее время мировая энергетика переживает период важных структурных изменений. Наблюдается устойчивый ввод мощностей ВИЭ. Анонсированы долговременные контракты на поставку возобновляемой энергии. Как прогнозирует Всемирное энергетическое агентство [1], в ближайшие десятилетия возможна существенная трансформация мировой структуры генерации электрической энергии.

Хранение энергии возможно с использованием различных физических принципов, выделяют следующие способы аккумулирования электрической энергии:

- Механический (маховики, гидроаккумулирование)
- Химический (Водород, биодизель, биотопливо)
- Электрохимический (АКБ, суперконденсаторы)
- Магнитный (Сверхпроводящие магнитные системы)

**Таблица 1. Сравнительные характеристики систем аккумулирования для систем киловаттного класса [2]**

Характеристика системы	Аккумуляторные батареи	Дизель генераторная установка	Водородное аккумулирование
Время автономности	< 0,5 ч	> 1 ч	> 1 ч
КПД, %	60 - 90	15 - 25	35 - 50
Необходимость регулярного обслуживания	Высокая	Высокая	Низкая
Зависимость от привозного топлива	Нет	Да	Нет

Необходимость развития новых энергетических технологий начинают осознавать и в нашей стране. Проект энергетической стратегии РФ до 2035 г. указывает на новые технологии, распространение которых раньше или позже приведет к большему количеству энергии от ВИЭ в энергобалансе, особенно в изолированных местах страны. Для хранения этой энергии понадобится современный и технологичный способ аккумулирования энергии. Водородный цикл может стать хорошим способом аккумулирования энергии благодаря высокому времени автономности, а также благодаря уже имеющимся заделам в этой области.

### Литература

1. IEA. World Energy Outlook 2016. — Paris : IEA, 2016.
2. Д.О. Дуников Водородные энергетические технологии // Материалы семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН, 2017. – Выпуск 1. с. 5 – 21

*Д.В.Трякин, студ.; рук. П.С.Шуркалов, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ВЕТРОАГРЕГАТ ПРЯМОГО ПРИВОДА С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ**

Принцип действия ветроустановки (ВЭУ) представляется следующим образом: кинетическая энергия ветра приводит в движение лопасти, которые при помощи привода соединены с ротором ветрогенератора. Благодаря наличию на статоре обмотки механическая энергия вращения ротора преобразуется в электрический ток, который может быть передан на дальние расстояния. Для непосредственного использования полученного тока в месте выработки необходимо преобразовать его из переменного в постоянный с помощью инвертора, встроенного в схему электроснабжения.

Если принцип получения энергии от ветрового потока для всех ветроустановок одинаков, то передача кинетической энергии от лопастей к генератору может быть различной. В настоящее время для этого чаще всего используется редукторный привод. Использование данного типа привода сопряжено с финансовыми издержками на обслуживание подшипников, незначительный износ какого-либо из них может привести к снижению эффективности ветроустановки. Дальнейшая ее эксплуатация в этом случае может привести к разрушению подшипника, что влечет за собой опасность повреждения остальных частей ВЭУ. В качестве альтернативы редукторному приводу выступает использование магнитного привода, его преимущество заключается в отсутствии истирающихся между собой деталей и, как следствие, в меньших затратах на обслуживание (ремонт изношенных частей, смазку) [1].

В данном проекте рассматривается создание модели горизонтально-осевой ветроэнергетической установки с прямым (магнитным приводом). В ходе работы были определены состав и технические характеристики ВЭУ:

- Мощность: до 500 кВт
- Количество лопастей: 3
- Частота вращения ротора: до 1000 об/мин
- Диаметр ротора: до 48 м
- Номинальная скорость ветра: 12 м/с
- Частота:  $50 \pm 0,4$  Гц

ВЭУ с магнитным приводом имеют больший КПД в сравнении с аналогами, обладающими редукторным приводом, вследствие снижения потерь на трение и уменьшения времени вхождения в рабочий режим.

*Р.О. Носков, студ.; рук. А.М. Грибков, к.т.н., проф.;*  
*конс. А.К. Лямасов, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

## **АЭРОСТАТНО-ПЛАВАТЕЛЬНАЯ ВЕТРОТУРБИНА**

В новом поколении воздушной ветроэнергетики (AWES) широкое применение получили системы с крыльями планерного типа, а также подъемные аэростаты. Высотная ветротурбина на надувной конструкции объединяет преимущества данных типов, что позволяет отойти от современного тренда в ветроэнергетике, который заключается в ориентации на поистине гигантские сооружения.

Установка состоит из оболочки обтекаемой формы в виде двух крыловых профилей, заполненной гелием [1]. Использование аэростатной и аэродинамической подъемных сил позволяет расположить турбину в мощных устойчивых ветрах на больших высотах за пределами досягаемости традиционной ветроэнергетики.

По проведенным расчетам воздушная ветротурбина на высоте до 600 метров генерирует в два раза больше энергии, чем ветряные турбины того же типоразмера, установленные на башне. Однако выявлено, что критическими параметрами являются масса установки и размер ветроколеса, которые необходимо оптимизировать.

Для эффективного использования установки разрабатывается математическая модель, с целью параметрического синтеза, а также возможности получения аналитического решения по оценке параметров станции в зависимости от граничных условий, среди которых некоторые климатические особенности предполагаемого места базирования.

Существует необходимость составления уравнений, определяющих баланс сил, действующих на установку. Для их решения широко применяются методы математического моделирования. Обязательным условием проведения корректных расчетов является верификация используемого программного обеспечения и выработка правильной методики их проведения.

Определяемые величины подъемной силы, силы лобового сопротивления и отрывной зоны при обтекании профиля подлежат сравнению и корректировке с данными, полученными экспериментальным путем. По результатам сравнения численного трехмерного моделирования с экспериментальными данными определяется возможность использования программного комплекса и методики применения данного пакета для решения задач аэродинамики крыла, уточняется математическая модель.

### **Литература**

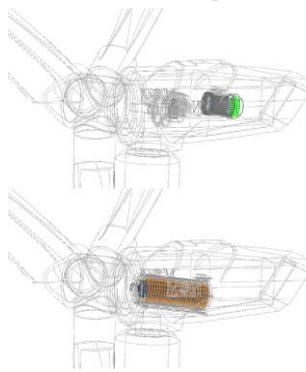
**1. Носков Р.О., А.К. Лямасов.** Энергетика. Технологии будущего. «Сборник тезисов докладов» от 28-29 мая 2019 г. Москва Издательство МЭИ.

*Б.Ф. Кузнецов, студ.; рук. П.А. Курбатов, д.т.н., проф.;  
конс. О.Н. Молоканов, к.т.н.  
(НИУ «МЭИ»)*

## ВЕТРОАГРЕГАТ ПРЯМОГО ПРИВОДА С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

В данном проекте рассматривается возможность создания ветроагрегата прямого привода с улучшенными массогабаритными показателями с использованием технологии бесщёточного электрогенератора с интегрированным магнитным редуктором. Конструкция, описанная в работе, позволит избавиться от механического редуктора, содержащего истирающиеся детали, чем значительно снизит затраты на ремонт и эксплуатацию ветроагрегата. Высокий передаваемый момент такой машины достигается за счёт использования магнитного редуктора, в котором для создания магнитного поля вместо токовых обмоток применяются постоянные магниты [1]. Благодаря интегрированному магнитному редуктору машина будет нагреваться гораздо меньше, что даёт возможность сделать её сравнимой по размерам с системой редуктор - генератор в редукторных ветроагрегатах. Более того, предлагаемая конструкция будет обладать более высокой надёжностью и сможет работать в условиях Арктики, также снизятся затраты на эксплуатацию установки.

В работе произведено компьютерное моделирование генератора в статическом режиме, найдена наиболее эффективная конфигурация параметров машины номинальной мощностью 500 кВт. Проведён анализ различных конфигураций обмоток статора [2], построены характеристики момента машины и удельных моментов на объём и на массу магнитов. Проведено сравнение с реальными конструкциями ветроагрегатов номинальной мощностью 500 кВт и построены виртуальные 3D-модели конструкций классического редукторного ветроагрегата и ветроагрегата с прямым приводом для проведения сравнительного анализа.



**Рис. 1. Виртуальные 3D модели традиционной и модифицированной конструкций ветроагрегата**

### Литература

1. **Atallah K.,** Calverley S., Clark R., Rens J., Howe D. A new PM machine topology for low-speed, high-torque drives // Proc. - Int. Conf. Electr. Mach., ICEM. 2008.
2. **Frandsen, T.V.,** Mathe, L., Berg, N.I., Holm, R.K., Matzen, T.N., Rasmussen, P.O., Jensen, K.K. Motor Integrated Permanent Magnet Gear in a Battery Electrical Vehicle // IEEE Trans Ind Appl. 2015.

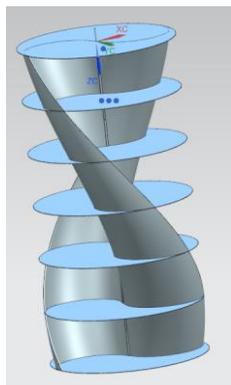
**В.Д. Свистунов, студ.; рук. А.Г. Васьков, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)**  
**РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**  
**УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ВЕТРОКОЛЕСА**

Процесс непрерывного развития возобновляемой энергетики на территории Российской Федерации не останавливается ни на мгновение. Поэтому разработки в области ветроэнергетики останутся актуальными в течение многих лет.

В работе был рассмотрен вопрос моделирования ветроколеса на основе ротора Савониуса, подготовленного для работы в условиях городской местности.

Для оценки аэродинамических показателей ветроколеса была построена усовершенствованная модель ротора по сравнению с предыдущей [1], так как она имеет сглаженные секции, позволяющие выровнять момент давления, и увеличенный размер для большей мощности.

Расчет проводился на основе геометрической модели, построенной в программе Siemens NX. Симулирование обтекания полученной поверхности потоком воздуха проводилось в программе FloEFD.



**Рис. 1.** Усовершенствованный ротор Савониуса

Результатом расчета является зависимость «Момент сил давления» от скорости ветра и зависимость момента от угла поворота лопасти по отношению к ветровому потоку. Целью создания усовершенствованной модели являлось снижение колебаний момента. Последняя характеристика показала, что момент ротора снизился до 6-9% от среднего.

Также путем пересчета были получены мощностные характеристики, такие как механическая мощность при изменяющихся скорости ветра для идеального ветроколеса. Они позволили оценить максимальную мощность ветроколеса при различных моментах электрического сопротивления генератора, что поможет в дальнейшей работе и выборе генератора.

### Литература

1. Свистунов В.Д., Васьков А.Г. РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ // Энергетика. Технологии будущего. Науч.-техн. конф. студентов (28 – 29 мая 2019 г., Москва): сборник тез. докл. – М.: Издательство МЭИ, 2019. – 84 с.

*М.А. Плотников, студ.; рук. В.Б. Баль к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ИНДУКТОРНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА ДЛЯ ВЕТРОАГРЕГАТА**

Развитие ветроэнергетики сдерживается в настоящее время высокой стоимостью современных ветроустановок. Снизить стоимость ветроустановки можно путём отказа от дорогих технологий и максимального упрощения конструкции.

Вертикально-осевая ветроустановка имеет наиболее простую конструкцию среди известных ветроагрегатов. Установка представляет собой генератор, установленный на неподвижном основании, с ротором, вращающимся в горизонтальной плоскости, сочленённый с вертикальноосевой ветротурбиной типа Савониуса или Дарье.

Вентильно-индукторный генератор имеет кольцевую структуру, состоит из двух концентрически расположенных статоров и кольцевого ротора, вращающегося между статорами. Каждый статор представляет собой кольцевой ряд электромагнитов с фазными обмотками. Ротор состоит из ряда ферромагнитных сегментов с крепёжными элементами и опорами для вращения внутри кольцевых статоров.

Работа генератора обеспечивается коммутатором, являющимся неотъемлемой частью генератора, который обеспечивает соединение фаз генератора с накопителем энергии (конденсаторной батареей). Электроэнергия, выработанная генератором и накопленная в конденсаторной батарее, преобразуется инвертором в 3-фазное переменное напряжение и направляется либо в электрическую сеть, либо для питания автономной нагрузки.

Работа генератора осуществляется следующим образом. Коммутатор поочередно подключает фазы генератора к конденсаторной батарее для возбуждения фаз, когда ток и магнитный поток фазы возрастают до необходимого уровня. Далее коммутатор отключает возбуждённую фазу от конденсаторной батареи и замыкает её накоротко. В этом режиме фаза находится большую часть цикла коммутации. В это время механическая энергия ветротурбины преобразуется в энергию магнитного поля возбуждённой фазы. В конце цикла коммутации коммутатор опять соединяет фазу с конденсаторной батареей, и накопленная энергия магнитного поля передаётся в накопитель энергии. Возбуждение фазы происходит в момент совпадения электромагнита фазы с ближайшим сегментом ротора, когда магнитная проводимость электромагнита фазы максимальна, а затраты электроэнергии на возбуждение минимальны.

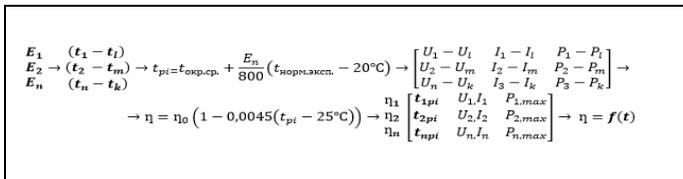
*А.С. Лысова, студ.; рук. А.Г. Васьков, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОВЕДЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Одним из факторов, влияющих на эффективность солнечных фотоэлектрических систем, является температура их поверхности. Для изучения влияния данного параметра на работу фотоэлектрических солнечных систем, а именно на максимальную энергетическую эффективность, необходимо разработать алгоритм для построения математической модели зависимости эффективности солнечного модуля от температуры.

На рис. 1 приведена структурная схема предлагаемого алгоритма. Алгоритм представляет собой последовательность этапов для построения математической модели зависимости эффективности солнечного модуля от температуры. На первом этапе выбираются значения интенсивности солнечного излучения, при которых определяются основные параметры солнечного модуля: напряжение, ток, выходная мощность и температура окружающей среды. Важным этапом является определение диапазонов температур и интенсивностей солнечного излучения, при которых работает данная фотоэлектрическая солнечная система, а также определение по формуле пересчета температуры поверхности солнечных модулей. После проведения операций по пересчету исследуемого параметра определяется эффективность работы фотоэлектрической солнечной системы при определенном значении интенсивности солнечного излучения и температуре поверхности фотоэлектрической ячейки.

В работе изучается влияние температуры поверхности солнечного модуля на его основные параметры, создан алгоритм по изучению влияния широкого диапазона температур на максимальную энергетическую эффективность солнечных модулей.



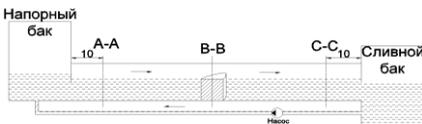
**Рис. 1** Структурная схема алгоритма по изучению влияния температуры на эффективность солнечных модулей

*И.Н. Ермаков, студ.; рук. Б.М. Орахелашвили, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

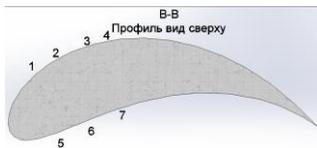
## ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПЛОТИННОЙ ГЭС.

Продолжением тематики, изложенной в [1], является детальное изучение и параметризация основных характеристик и габаритов канала.

В процессе итерационного расчета определяются оптимальные размеры сечения русла реки по отношению к толщине гидродинамической колонны. Для изменения ширины сечения канала используются подвижные стенки. Это позволит провести достоверный практический эксперимент и сопоставить его с результатами моделирования, а также внести необходимые корректировки. Целью расчета является получение динамических характеристик потока и согласование экспериментальных значения скоростей в разных точках потока с результатами математического моделирования в САПР пакетах, использующих метод конечных элементов.



**А-А и С-С**



Создана методика оперативной обработки и структуризации экспериментальных данных. Данная методика заключается в выборе 3 характерных сечений канала, необходимых для построения эпюр изменения скоростей и давлений в канале. Сечения А-А и С-С выбираются на расстоянии в 10 см от напорного и сливного баков (исток и устье реки). В них назначаются 9 опорных точек, которые являются граничными условиями для МКЭ. В сечении В-В устанавливается обтекаемый профиль, на поверхности которого создаются 7 точек отбора давления - 4 на выпуклой и 3 на вогнутой стороне.

Математическая обработка экспериментальных данных даст возможность сопоставить их с результатами математического моделирования. Преимущество данной методики в легкости и оперативности проведения эксперимента, а также в получении достоверных данных об изменении поведения потока жидкости в условиях установившегося течения.

### Литература

1. **Орахелашвили Б.М.**, Ермаков И.Н. Бесплотинная ГЭС с гидротурбиной, размещенной внутри гидродинамической колонны. // 2019

**Г.А. Кромм, студ.; рук. Б.М. Орахелашвили, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)**  
**АНАЛИЗ РАБОТЫ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ОСЕВОЙ**  
**ПРЯМОТОЧНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ ДЛЯ МАЛОЙ ГЭС**

Ранее был выполнен анализ научной литературы и теоретический расчёт осевой прямоточной гидротурбины (ОПГТ), что позволило провести оценку режимных и габаритных показателей. Для достижения мощности в 20 кВт при напоре не менее 3 м необходимый диаметр рабочего колеса (РК) составляет 0,5 м, расход  $0,7 \div 0,8 \text{ м}^3/\text{с}$ , частота вращения  $500 \div 600 \text{ об/мин}$  [1].

На основе этих данных в программном комплексе CAE "SolidWorks" созданы модели различных вариантов РК и цилиндрического направляющего аппарата (ЦНА) (рис. 1). Выполнен ряд виртуальных экспериментов (ВЭ) 3D-течения в ЦНА в универсальном программном комплексе CAE "Ansys" по методу конечных элементов (МКЭ). Для проведения эксперимента задавались следующие граничные условия: распределение давления на входе в ЦНА, массовый расход на выходе, полуэмпирическая  $k-\varepsilon$  модель турбулентности, количество итераций расчёта - 100. В таблице приведены исходные данные для проведения ВЭ, результаты которого хорошо согласуются с теоретическими оценками и позволяют сделать вывод о работоспособности ЦНА в составе ОПГТ.

Кол-во лопаток ЦНА	Радиус скелета лопатки, мм	Толщина лопатки, мм	Стеснение потока на втулке, %	Угол охвата лопатки, град			Отношение длины хорды профиля к периоду решётки			Окружная составляющая абсолютной скорости на выходе, м/с		
				вт.	ср.	пер.	вт.	ср.	пер.	вт.	ср.	пер.
7	73,5	5	6,3	75,7	47,6	37,7	2,3	0,7	0,4	6,4	3,0	2,3
13			11,8				4,2	1,3	0,8			
19			17,2				6,2	1,9	1,2			

Следующим этапом является анализ совместной работы ЦНА и РК, для которых строятся 3D-модели течения жидкости через лопастные системы и проводятся соответствующие ВЭ. По результатам расчетов будет оптимизирована геометрия проточного тракта и лопастных систем ОПГТ.

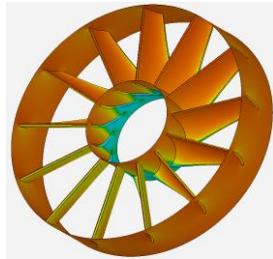


Рис. 1. Модель ЦНА

### Литература

1. Кромм Г.А., студ.; рук. Орахелашвили Б.М., к.т.н., доц., Малая ГЭС на базе осевой гидротурбины с генератором на постоянных магнитах, сборник тез. докладов НТКС: - М.: Издательство МЭИ, 2019.

*Н.А. Муратов, студ.; рук. А.И. Давыдов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ «НАРОСТОВ» НА  
 «ЭФФЕКТ БУГОРКОВ» ДЛЯ СОЗДАНИЯ  
 ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ**

В связи с актуальностью проблемы, изложенной в [1], было рассмотрено проявление «эффекта бугорков» [2] применительно к 3D модели рабочего колеса (РК) насоса К-65-50-160. Был произведен расчет с использованием программного комплекса «FlowVision», результаты которого показали, что данный эффект уже в первых приближениях позволил увеличить значение гидравлического КПД на 1,16% по сравнению со значением для исходного рабочего колеса.

С целью достижения максимального эффекта от данного явления в настоящий момент ведутся работы по определению оптимальных геометрических параметров «наростов» [1], на поведение распределения полей скоростей, давлений и спутного следа на примере обтекания пластины. Для этого в программном комплексе САЕ «SolidWorks» были созданы модели плоской пластины (рис.1), и пластины с «наростами» в области лобовой части (рис.2).

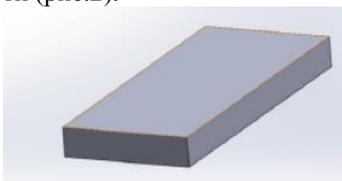


Рис.1.

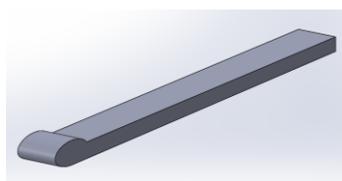


Рис.2.

Следующим этапом, используя технологию 3D печати, планируется создание реальных моделей пластин и проведение серии физических экспериментов на гидродинамическом лотке МЭИ. Сравнение полученных экспериментальных результатов с данными расчетных исследований позволят сделать выводы о достижении оптимальных геометрических параметров «наростов». Впоследствии результаты исследования пластины позволят целенаправленно модернизировать РК насоса.

### Литература

1. **Муратов Н.А.**, студ.; рук. Давыдов А.И., к.т.н., доц., Использование природоподобных технологий при создании высокоэффективных динамических насосных агрегатов, НТКС: сборник тез. докл.-М.: Издательство МЭИ, 2019.
2. **Frank E. Fish.** Biomechanics of Swimming Mammals // Energetics, Hydrodynamics, 1996.

## **Секция 4**

### **Распределенная генерация**

научный руководитель –  
заведующий кафедрой ТОТ, к.т.н. **К.А. Орлов**

*Е.В. Афанасьева, студ.; рук. И.А. Милюков, к.т.н., доц.;  
конс. Осипов С.К., к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

## **АВТОНОМНАЯ КОГЕНЕРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА НА ПЕЛЛЕТНОМ ТОПЛИВЕ**

В настоящее время для удаленных и труднодоступных регионов России существует проблема организации их энергообеспечения, характеризующейся высокой стоимостью привозного углеводородного топлива и отсутствием технической возможности присоединения к централизованным системам энергоснабжения. В этом случае возникает необходимость использования местных видов топлива (дрова, древесные отходы, топливный торф, брикеты). Существующие технологии преобразования твердых видов топлива в тепловую и электрическую энергию обладают большим количеством оборудования и высокой стоимостью (ГТУ с газификатором, микро- ПТУ). Одним из альтернативных вариантов энергоснабжения, использующей местный вид твердого топлива, могут являться энергетические комплексы на пеллетном топливе [1].

В этих установках воздух сжимается в компрессоре, затем поступает в пластинчатый теплообменный аппарат (ТА), где он нагревается от высокотемпературных газов от пеллетной горелки и поступает в турбодетандер. Часть энергии, вырабатываемой турбодетандерной установкой, используется для собственных нужд биокотла, остальная может использоваться для нужд потребителей. После турбодетандера нагретый воздух поступает в пеллетный котел для организации процессов горения. Энергия от сжигания топлива передаётся воде, поступающей в котел из тепловой сети. В результате вариативного термодинамического анализа тепловой схемы были рассчитаны параметры энергетического комплекса с электрической мощностью 5 кВт при степенях сжатия в компрессоре, лежащих в диапазоне от 3 до 11, и температуре воздуха перед турбодетандером 850 °С. КПД комплекса при этих параметрах изменяется от 19,4 до 33,3%. В дальнейшем в работе будут решены вопросы, связанные с проектированием пластинчатого ТА: конструкторский и поверочный расчет, разработка трехмерной модели, расчетно-экспериментальное исследование новых методов интенсификации теплообмена для улучшения его теплогидравлических характеристик по сравнению с существующими аналогами.

### **Литература**

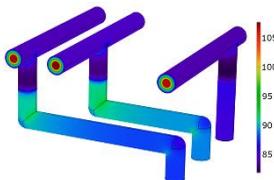
1. **Komarov I., Rogalev A., Rostova D.** Autonomous Biofuel Power Unit to Provide Thermal and Electrical Energy for Individual Consumers // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – IEEE, 2018. – С. 1-5.

*Д.В. Голубев, студ.; рук. С.В. Белоусов, к.т.н., доц.; конс. Д.И. Ковалев (НИУ «МЭИ»)*

## РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА ПО ВЫПУСКУ И РЕАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСТРОЙСТВ С ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ.

В соответствии с планом выполнения магистерской диссертации был осуществлён обоснованный выбор эпоксидной изоляции с указанием важнейших характеристик, а также выбрана технология изготовления электроизоляционного корпуса устройства.

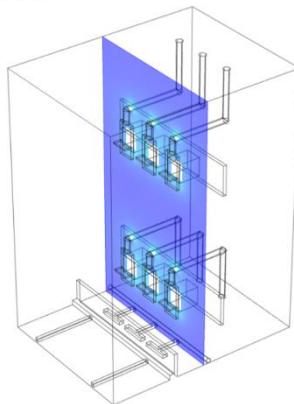
С учетом конструктивных требований, требований к технологичности и простоте сборки и изготовления в качестве основного технического решения для единого корпуса выключателя нагрузки и разъединителя-заземлителя выбран цилиндр, изготовленный из полиэфирных или полиамидных волокон, пропитанный термореактивным связующим на эпоксидной основе. Относительно технологии изготовления для цилиндров была выбрана технология вакуум-нагнетательной пропитки на основе использования пропиточного эпоксидного компаунда.



**Рис. 2.** Расчет температуры на поверхности диэлектрика шин

в программном комплексе COMSOL multiphysics.

На следующих этапах выполнения работы планируется более детальная проработка внутренних частей распределительной ячейки и изучение положительного эффекта от внедрения предлагаемой эпоксидной смолы в качестве изоляционного материала.



**Рис. 1.** Распределения потенциала внутри КРУТ 10кВ в COMSOL multiphysics

В целях обоснования выбранного изоляционного решения были выполнены электрические расчёты распределения потенциала внутри ячейки (Рис. 1.), а также отдельные термические расчёты токоведущих шин, покрытых изоляционным компаундом (Рис. 2.) в программном комплексе COMSOL multiphysics.

### Литература

1. **А.В. Коваленко** Математическое моделирование физико-химических процессов в среде Comsol Multiphysics 5.2., 2017 г.
2. **Вариводов В.Н.,** Демкин А.А., Емельянова Л.И. Зависимость электрической прочности литой эпоксидной изоляции от размеров в слабонеоднородном электрическом поле// Энергоатомиздат, «Электротехника», 1983 г., № 1, с. 33-36

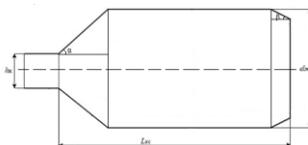
*А. Кайраткызы, студ.; рук. М.В. Горелов, к.т.н., доц.;  
рук. НИОКТР И.И. Комаров, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ПРОДУКТОВ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТКО

В современном мире одной из актуальных проблем является утилизация твердых коммунальных отходов (ТКО). Для решения данной проблемы предлагается тепловая схема с утилизацией продуктов термического разложения ТКО в газотурбинном цикле. Предлагаемый технологический комплекс состоит из элементов: газификатор, ГТУ (охлаждаемая камера сгорания, радиально-осевая турбина, компрессор), электрогенератор. Тепловая эффективность схемы составила  $\eta = 26\%$  при начальной температуре газов на входе в турбину  $900\text{ }^\circ\text{C}$ . Основной проблемой данной схемы является то, что морфологический состав ТКО не однороден и имеет разную теплотворную способность в зависимости от сезона года. Для решения данной проблемы необходимо ввести в состав ТКО высококалорийные компоненты – отходы деревообработки. С учетом этого проведен расчет газификации, по результатам которого теплотворная способность газа составила  $7,76\text{ МДж/м}^3$  (пароокислородная газификация). Специальной задачей работы является проектирование камеры сгорания с тепловой мощностью  $Q_{\text{теп}} = 769\text{ кВт}$ . Конструктивный облик камеры сгорания приведен на рис. 1.

Камера сгорания должна соответствовать следующим требованиям: высокая полнота сгорания; равномерное охлаждения стенок жаровой трубы; равномерная эпюра температуры газов на выходе; низкий уровень выбросов ( $NO_x$ ).

В результате конструкторского расчета были определены основные габаритные размеры камеры сгорания: объем  $V_{\text{ж}} = 0,011\text{ м}^3$ , диаметр  $d_{\text{ж}} = 0,178\text{ м}$ , длина  $L_{\text{жс}} = 0,53\text{ м}$ , диаметры отверстий для вторичного воздуха в зонах горения  $d_{\text{г}} = 0,016\text{ м}$  и смещения  $d_{\text{см}} = 0,012\text{ м}$  (рис.1) [1]. В дальнейшем будет выполнено численное моделирование процессов горения и теплообмена в рабочем объеме камеры сгорания с использованием Ansys CFX.



**Рис. 1. Основные размеры камеры сгорания**

### Литература

1. **В. Ф. Харитонов.** Проектирование камер сгорания: учеб. пособие. Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2008.

*Е.С. Ковшикова, студ.; рук. И.И. Комаров, к.т.н.;  
конс. А.С. Маленков, к.т.н. (НИУ «МЭИ»)*

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ С РЕАКТОРОМ СТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Рассмотрена принципиальная схема энергоустановки мощностью 1000 кВт для выработки электроэнергии за счёт сжигания отходов деревообрабатывающего производства (опилок). Особенностью энергоустановки является то, что утилизация древесных отходов происходит в реакторе, работающем по принципу двухступенчатого сжигания [1]. В качестве первой ступени выступает газификатор, в качестве второй – камера сгорания генераторного газа, при этом утилизация продуктов сгорания осуществляется в газотурбинном цикле (рис.1).

Выполнен расчет изменения параметров работы газификатора в зависимости от изменения коэффициента избытка воздуха, влажности опилок, степени сжатия компрессора.

Расчитан материальный и тепловой баланс горения генераторного газа, на основе которого определены габаритные размеры зоны газификации отходов деревообработки, а именно: высоты зон сушки, окисления и восстановления.

Выполнена предварительная компоновка камеры сгорания.

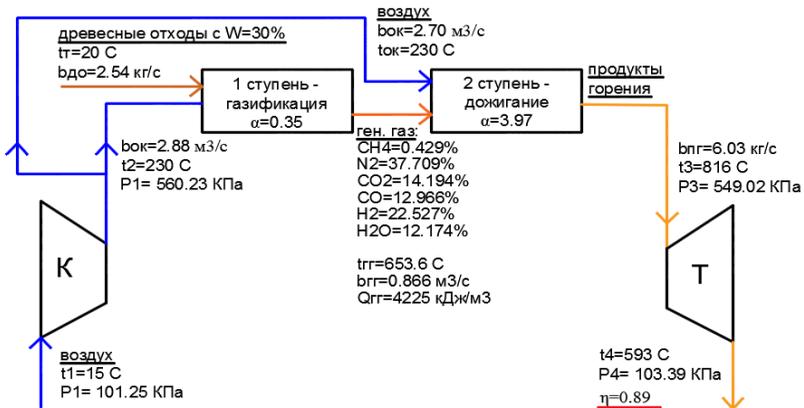


Рис. 1.Схема утилизации теплоты от сжигания древесных отходов

### Литература

1. Chaney J., Liu H., Li J. An over view of CFD modeling of small-scale fixed-bed biomass pellet boilers with preliminary results from a simplified approach //Energy Conversion and Management. – 2012. – Т. 63. – С.149-156.

*Ю. К. Лукина студ.; рук. А. А. Волошин, к.т.н.;  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СРЕДСТВАМИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В МАГИСТРАЛЬНЫХ СЕТЯХ**

В настоящее время остро стоит вопрос повышения качества электроэнергии, так как оно существенно влияет на расход электроэнергии, надежность систем электроснабжения, технологический процесс производства. Скоординированное и автоматическое управление средствами компенсации реактивной мощности (СКРМ) является одним из эффективных путей целесообразного использования электроэнергии.

Централизованные системы способны хорошо решать задачу уменьшения потерь и скоординированного управления для неизменной топологии сети. Однако внесение изменений в топологию требует перенастройки всей системы, что может привести к выводу системы из работы после непредусмотренного изменения схемно-режимной ситуации. Решением данной проблемы является использование децентрализованных систем. Одной из реализаций децентрализованного подхода являются мультиагентные системы управления.

Основными преимуществами таких систем являются устойчивость и расширяемость. Устойчивость - это возможность сохранения работоспособности всей системы агентов при выходе из строя одного или более агентов. Расширяемость - легкое интегрирование новых агентов в уже существующую систему. Гораздо проще при необходимости добавить новых агентов, чем реорганизовывать монолитную систему.

Децентрализованный подход для регулирования СКРМ позволяет в автоматическом режиме оптимизировать работу группы подстанций по потерям активной мощности. Мультиагентный принцип построения системы управления позволяет как вносить изменения в существующую топологию сети, так и производить ремонтные и пуско-наладочные работы на подстанции без перенастройки программного обеспечения.

### **Литература**

1. **Гвоздев Д.Б.** Новый подход к управлению уровнями напряжения и компенсацией реактивной мощности в электрических сетях 110-220 кВ//Вестник Мэи. №6 2016

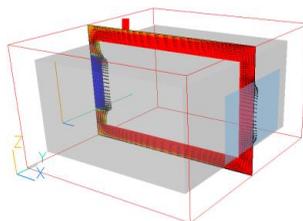
*А.А. Кобзева, студ.; рук. В.С. Глазов, к.т.н., доц.;  
рук. НИОКТР Нефедкин С.И., д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ НА БАЗЕ ВОДОРОД-ВОЗДУШНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ОТКРЫТЫМ КАТОДОМ**

Твердополимерные водород-воздушные топливные элементы с открытым катодом (РЕМФС), использующиеся в качестве энергосистем для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), обеспечивают в 3-4 раза более длительный полет, чем при использовании литий-полимерных аккумуляторных батарей [1]. Однако такая энергоустановка имеет прямой контакт с окружающим воздухом, который подается в энергосистему нагнетателем и используется не только как реагент для катодной реакции, но и для отвода теплоты. Для обеспечения стабильной работы такой энергосистемы на различных режимах БПЛА необходимо поддерживать параметры входящего воздуха в узком диапазоне температур ( $10 \div 25^\circ\text{C}$ ). Чтобы увеличить область эксплуатации БПЛА в широком диапазоне температур и высот полета, актуальным является создание системы термостабилизации энергетического модуля топливных элементов (ЭМТЭ). Такая система должна обеспечивать оптимальные параметры входящего в ЭМТЭ воздуха в более широком диапазоне температур и влажности.

Цель работы - повышение эффективности энергетического модуля на базе РЕМФС в широком диапазоне температур и высот эксплуатации БПЛА. На 1-ом этапе её реализации были разработаны две модели с сосредоточенными и распределенными параметрами (СП и РП). Необходимость разработки второй модели обусловлено желанием выявить локальные особенности протекания процесса теплообмена в ограниченном термооболочкой объеме, содержащем ЭМТЭ.

На рис. 1 представлен результат численного 3D моделирования по модели РП, структура которой обеспечивает двухходовую циркуляцию наружного воздуха в системе термостабилизации ЭМТЭ.



**Рис. 1. 3D модель с распределёнными параметрами**

### **Литература**

1. **Нефедкин С.И.** Автономные энергетические установки системы: М.: Издательство МЭИ, 2018. -220 с.

*П.М. Нестеров, студ.; рук. О.М. Митрохова, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## РАЗРАБОТКА ТУРБОУСТАНОВОК ДЛЯ ПГУ, РАБОТАЮЩЕЙ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

На первом этапе работы была разработана методика расчета простой ГТУ, которая позволяет определять основные теплофизические характеристики рабочего тела ГТУ при различной степени влажности наружного воздуха и различных составах топлива, сжигаемого в КС.

Основные характеристики газотурбинной установки выбирались для обеспечения ее надежной и оптимальной работы в составе одноконтурной ПГУ утилизационного типа. Температура продуктов сгорания перед газовой турбиной оценивалась из условия эксплуатационной надежности лопаточного аппарата газовой турбины при использовании закрытой системы охлаждения и принята равной  $t_c=1135^\circ\text{C}$ , а оптимальная степень сжатия (с точки зрения обеспечения максимального КПД газотурбинной установки при выбранной начальной температуре газов) составила  $\varepsilon=12$ .

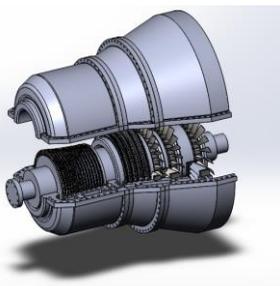
На втором этапе был проведен расчет паросиловой установки ПГУ с одноконтурным котлом утилизатором и определены основные технико-экономические показатели ПГУ. На основе результатов расчета ПСУ разработана 3D модель одноцилиндровой паровой турбины с петлевым движением рабочего тела и осевым выхлопом.

Из основных направлений использования твердого топлива в ПГУ наиболее перспективным является использование ГТУ с выносной КС с топочными устройствами вихревого циклонного типа, после которых продукты сгорания направляются в сепараторы инерционного типа, что позволяет снизить содержание твердых частиц на 95-98%.

Очевидно, что очистка газов после выносной КС не может полностью решить проблему абразивного износа лопаточного аппарата ГТ, поэтому на следующем этапе при разработке проточной части газовой турбины решаются задачи, связанные с определением допустимой концентрации твердых частиц, выбором рациональной формы лопаточного аппарата и др., направленные на уменьшение интенсивности износа.

### Литература

1. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 667 с.



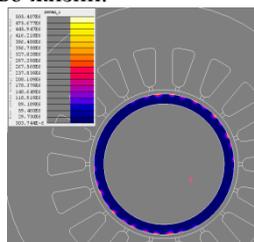
**Рис. 1. Паровая турбина с осевым выходом для одноконтурной ПГУ утилизационного типа**

*К.Н.Соловьева, студ.; рук. А.В.Сизякин, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## РАЗРАБОТКА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ПАРОВОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Развитие нашей страны требует создания объектов распределенной энергетики. Большая часть России не охвачена централизованными системами генерации электрической и тепловой энергии. Одно из решений задачи - разработка и создание паротурбинных мультитопливных энергетических установок малой мощности. Такие установки распределенной когенерации мощностью 50-100 кВт позволят решить задачу снабжения теплом и электроэнергией небольших поселков, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке, где огромные средства расходуются на завоз топлива. Эксплуатация распределенной энергетики на базе местного возобновляемого биотоплива (дрова, опилки, отходы переработки древесины и т.п.) может дать значительную экономию средств и повысить качество жизни.

Важнейшим этапом проектирования высоконагруженных электрических машин является проведение теплового расчёта. Для его выполнения на предыдущем этапе с помощью конечно-элементного моделирования были получены потери в элементах конструкции турбогенератора – статоре и роторе. На рисунке 1 приведено распределение потерь от вихревых токов в роторе машины. Для предотвращения выхода из строя обмоток и размагничивания постоянных магнитов ротора необходимо обеспечить надёжное отведение выделяющихся потерь от элементов конструкции машины. Для этой цели рассчитывается система интенсивного охлаждения.



**Рисунок 1 – распределение потерь от токов Фуко в роторе высокоскоростного турбогенератора**

### Литература

1. **Сугробов А.М.**, Русаков А.М. Проектирование электрических машин автономных объектов. М.: Издательский дом МЭИ 2012г.
2. **Копылов И.П.** и др. Проектирование электрических машин под. ред. И.П. Копылова. М.: Издательство Юрайт 2011г.
3. **Балагуров В.А.**, Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. М.: Издательство «Энергия» 1964г.

*А.А. Сорунзан, студ.; рук. Д.А. Хохлов, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОТОПЛИВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОТРАСЛИ**

Переход на сжигание биотоплива в настоящее время – одно из решений проблемы «парникового эффекта» [1]. Выбросы CO<sub>2</sub> при сжигании биотоплива не наносят такой урон окружающей среде, ввиду возобновляемости данного ресурса. Помимо этого, существуют отдалённые объекты промышленности, связанные с разработкой древесины. Отходы этой промышленности, в первую очередь щепы, имеют огромный потенциал для использования в энергетике.

В данной работе рассмотрены некоторые аспекты создания энергетической установки с применением биотоплива для выработки электроэнергии на газотурбинной установке (ГТУ), работающей в составе парогазовой установки (ПГУ). Сжигание биотоплива в данном случае реализуется в камерах сгорания ГТУ прямым способом. Готового решения такой задачи на текущий момент не существует [2].

Данный проект состоит из комплекса задач и решений, принимаемых для решения данных задач. Так в ходе работы было выбрано наилучшее с точки зрения сравнительных характеристик топливо – древесная пыль, используемая для производства пеллет. [3]. На основе данного выбора была подготовлена модель для проведения расчетов горения в программе ANSYS.

Текущими задачами проекта являются моделирование процесса горения в камере сгорания, исследование зависимости процесса горения от геометрии камеры сгорания, получение устойчивого и надежного горения биотоплива в камере сгорания при больших скоростях и малом времени пребывания в камере сгорания. В случае необходимости планируется также рассмотреть способ очистки продуктов сгорания от части золывых частиц.

Проработка данного проекта существенно расширит существующие знания об использовании биотоплива в энергетике, что, в свою очередь, позволит создавать более эффективные энергетические установки.

### **Литература**

1. **Ольховский Г.Г.** Разработка отечественной ПГУ с газификацией угля. Теплоэнергетика: теорет. и науч.-практ. журнал, 2010.
2. **Иванов В.Л.** Твердые бытовые отходы как топливо для газотурбинной установки. Вестник ПНИПУ. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2015.
3. **Белосельский Б.С.** Низкосортные энергетические топлива. Особенности подготовки и сжигания. М.: Энергоатомиздат, 1989.

*Е.В. Конюшенко, студ.; рук. М.Г. Киселев, к.т.н., доц.;  
конс. К.В. Крюков (НИУ «МЭИ»)*

## **РАЗРАБОТКА СИЛОВОЙ ЧАСТИ РЕГУЛЯТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЛИНЕЙНОГО ГЕНЕРАТОРА**

В данной работе рассмотрено устройство для увеличения эффективности отбора энергии от волны с помощью линейного генератора. Напряжение на выходе линейного генератора изменяется не только по амплитуде, но и по частоте, поэтому для согласования с сетью переменного тока необходимо применение согласующих устройств, позволяющих стабилизировать напряжение и частоту на выходе генератора [1].

Поскольку отличительной особенностью линейного генератора является наличие большой внутренней индуктивности, то для оптимальной системы управления, которая позволяет извлекать максимальную мощность из волны, необходимо управлять током статора с помощью резонансного регулирования [2].

В работе рассматривается макет линейного генератора, для которого были измерены следующие параметры: индуктивность, взаимная индуктивность и активное сопротивление обмоток генератора. Также были получены диаграммы напряжения на обмотках генератора в режиме холостого хода и при работе на согласованную нагрузку. По результатам измерений были рассчитаны максимальные значения выходной мощности для двух случаев: 1) при отсутствии компенсации внутренней индуктивности; 2) при компенсации внутренней индуктивности.

В докладе представлена методика расчета параметров элементов силовой части регулятора и получены выражения для определения максимального значения выходной мощности регулятора в зависимости от напряжения на шине постоянного тока. Определены значения компенсирующей и фильтрующей емкостей, а также значение напряжения на шине постоянного тока регулятора.

### **Литература**

1. **A. Z. Annuar**, D. E. Macpherson, D. I. M. Forehand and M. A. Mueller, Optimum power control for arrays of direct drive wave energy converters, // 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012), Bristol, 2012, pp. 1-6.
2. **F. Wu et al.**, Modeling, Control Strategy, and Power Conditioning for Direct-Drive Wave Energy Conversion to Operate With Power Grid // in Proceedings of the IEEE, vol. 101, no. 4, pp. 925-941.

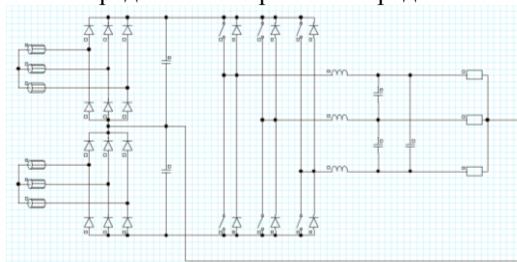
*А.С. Филатов, студ.; рук. А.В. Сизякин, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*  
**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ  
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ПАРОВОГО  
ТУРБОГЕНЕРАТОРА**

В ходе проведённой ранее работы были выявлены наиболее перспективные варианты структуры электронного преобразователя для системы электроснабжения на базе парового генератора. К этим структурам относятся:

- ПЧ на базе трех однофазных инверторов;
- ПЧ на базе трехфазного инвертора с конденсаторным делителем в звене постоянного тока.

Схема с конденсаторным делителем требует сложной системы регулирования напряжений на конденсаторах делителя. Поэтому на первом этапе было принято решение изготовить преобразователь именно по такой схеме. Существенными преимуществами этого решения также является возможность отладки инвертора в однофазном режиме, что существенно упрощает исследование. В качестве алгоритма управления выбран алгоритм с удвоением частоты коммутации, позволяющий существенно уменьшить размеры выходного фильтра инвертора.

Схема трёхфазного делителя содержит меньшее количество ключей, следовательно, массогабаритные показатели такой системы будут лучше, чем у системы с тремя однофазными инверторами. Для нивелирования недостатка, связанного со сложным управлением напряжением на конденсаторах делителя, предлагается пересмотреть структуру системы и выполнить электрическую машину с двумя группами обмоток, которые работают на выпрямители, соединённые последовательно. Такая схема включения позволит сразу получать на выходе выпрямительного блока напряжение со средней точкой. Схема предлагаемого решения представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – схема системы с трёхфазным инвертором.**

### **Литература**

1. **Грузков С.А.** и др. М.: Изд-во МЭИ, 2005. - (Электрооборудование летательных аппаратов : учебник для вузов : в 2 т.).

*Д.А. Шумилин, студ.; рук. М. Ю. Румянцев, к.т.н.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

Одним из наиболее перспективных направлений развития энергетики многих стран мира является развитие децентрализованных систем энергоснабжения и, как следствие, создание систем малой распределённой генерации тепловой и электрической энергии. Этот путь развития отражён и в энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года.

Одним из средств достижения намеченных целей является применение энергоустановок, работающих по органическому циклу Ренкина, в которых преобразование энергии осуществляется микротурбинным агрегатом, в котором на общем валу объединены высокоэффективная турбина и ротор синхронного магнитоэлектрического генератора. Рынок подобных агрегатов с каждым годом расширяется и захватывает свою особую нишу в сфере генерации электроэнергии.

Для реализации качественной и надёжной установки необходимо проводить разработку, используя 3D моделирование, компьютерные междисциплинарные расчёты методами конечных элементов, позволяющие получить наиболее полное описание физических процессов в установках и получать данные для их проектирования и конструирования.

Наряду с моделированием необходимо проводить экспериментальные исследования критических узлов энергоустановок. В докладе приведены данные о созданном на кафедре ЭКАО и ЭТ воздушном стенде, позволяющем испытывать высокоскоростные турбогенераторы мощностью до 3 кВт с приводом от воздушной турбины, которые можно считать прототипом для разработки микротурбинных энергоустановок на ОРЦ.

В работе представлены полученные экспериментальные характеристики воздушного стенда, результаты проектных расчётов воздушной микротурбины и синхронного генератора на постоянных магнитах, прочностные и вибрационные расчёты полученной геометрии ротора, разработанная эскизная 3D модель турбоагрегата, а также оценена возможность применения пластмасс в качестве корпусов турбоагрегата, изготавливаемых методами 3D печати.

### **Литература**

1. **Rumyantsev M.Yu., Sizyakin A.V., Shevyrev N.I.** Analysis of electromagnetic processes in high-speed electrical machines with foil gas-dynamic bearings // IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference. 2016. Varna. pp. 530-536.

## **Секция 5**

### **Передача электрической энергии**

научный руководитель –  
директор ИЭЭ, к.т.н. **В.Н. Тульский**

*А.Д. Приходько, студ.; рук. А.А. Волошин, к.т.н.;  
(НИУ «МЭИ»)*

## **РАЗРАБОТКА ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕКОНФИГУРАЦИИ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

Повсеместный ввод объектов распределенной генерации (ОРГ) связан с мировой тенденцией ухода от полностью централизованного построения энергосистем. Рост доли ВИЭ на рынке электроэнергии и ввод в эксплуатацию установок малой генерации открывают новые перспективы развития энергетического комплекса [1]. Наряду с этим включение ОРГ приводит к возникновению ранее не свойственных для распределительных сетей, имеющих в основном радиальную топологию, режимов работы.

Для перехода к новому укладу построения электрических сетей необходимо обеспечить должные показатели качества и надежности электроснабжения. Одним из ключевых этапов преодоления последствий массового внедрения ОРГ является внедрение в эксплуатацию интеллектуальных систем мониторинга и управления с новым подходом к регулированию [2].

Предлагаемая система регулирования основывается на мультиагентном взаимодействии узлов электрической сети, позволяя в реальном времени управлять реконфигурацией распределительной сети [3]. В данном подходе каждый агент представляет интересы определенного активного узла электроэнергетической системы. Для достижения своих целей им требуется контролировать параметры режима только на своем участке и обмениваться информацией с соседними агентами, с узлами которых существует электрическая связь. Такой принцип позволит учитывать интересы и потребности в каждом сегменте, что является важным фактором для сетей с распределенной генерацией.

### **Литература**

1. **Тен М.Г.** Мировая энергетика: современное состояние и прогноз развития // Территория новых возможностей. 2012. № 1 (14).
2. **Волошин А.А.,** Волошин Е.А., Рогозинников Е.И. Распределенная система автоматического управления генерацией, потреблением и накоплением электроэнергии в распределительных сетях с ВИЭ // Релейная защита и автоматика энергосистем: Межд. конф.: Санкт-Петербург, 2017.
3. **Фишов А.Г.,** Мукатов Б.Б. Реконфигурация электрических сетей с распределенной генерацией и мультиагентным управлением // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 1.

*Н.А. Сабайкин, студ.; рук. М.Г. Киселев, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

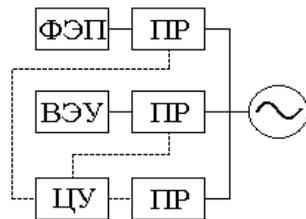
## АППАРАТ УПРАВЛЕНИЯ НЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ С УЛУЧШЕННЫМ ГАРМОНИЧЕСКИМ СОСТАВОМ ВЫХОДНОГО ТОКА

Современными тенденциями в энергетическом секторе России и мира являются: создание высокоинтегрированных интеллектуальных электрических сетей нового поколения (Smart Grid), уменьшение потерь в сетях электроснабжения, развитие распределенной генерации и силовой электроники.

В сети располагаются преобразователи с различными функциями: управление двигателем, выпрямление, передача электроэнергии от нетрадиционных источников энергии в сеть, накопление электроэнергии. Большинство этих устройств могут быть выполнены на основе одной структуры четырехквadrантного полупроводникового преобразователя (Рис. 1). На основе таких преобразователей возможно реализовать регулирование неактивной мощности в дополнение к основной функции. Для этого необходимо объединить управление преобразователей в единую информационную сеть, передающую информацию о состоянии напряжения и токов сети в точке подключения устройств. На основе полученной информации ЦУ вырабатывает наиболее эффективное задание для управления каждым из преобразователей, позволяющее улучшить качество напряжения и токов с уменьшенными потерями в преобразователе. В случае объединения в единую сеть множества таких устройств целесообразно применять методы искусственного интеллекта.

Актуальной целью работы является разработка аппарата управления неактивной мощностью сети на основе четырехквadrантного преобразователя с улучшенным гармоническим составом выходного тока, с функциями компенсации реактивной мощности, активной фильтрации и симметрирования токов. Полученные разработки могут быть применены при разработке преобразователей с другой основной функцией.

Перспективами работы являются: реализация методов управления на макете регулятора качества электроэнергии и расширение функций макета.



**Рис. 1. Структурная схема энергосистемы:**

**ФЭП** — фотоэлектрический преобразователь; **ВЭУ** — ветроэнергетическая установка; **ЦУ** — центр управления; **ПП** — четырехквadrанный преобразователь;

*А.Ю. Старкова, студ.; рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «СИСТЕМА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ»**

Надежность элементов воздушной линии электропередачи (ВЛ) зависит от наличия или отсутствия в них неисправностей, поэтому необходимо проводить контроль состояния опор, проводов, тросов и изолирующих подвесов. В настоящее время осмотр ВЛ в подавляющем большинстве случаев проводится непосредственно работниками электросетевого комплекса с последующим занесением результатов в листок осмотра.

Аппаратно-программный комплекс «Система оценки надежности воздушных линий электропередачи» позволит учитывать фактическое техническое состояние элементов ВЛ для определения показателей надежности линии. Для возможности учета неисправностей элементов ВЛ требуется создание цифрового двойника линии на базе системы автоматизированного проектирования (САПР) NX Siemens.

Система NX Siemens позволяет осуществлять моделирование механических нагрузок на основе цифровой модели объекта, следовательно, для создания функционирующего аппаратно-программного комплекса необходимо моделирование совокупности неисправностей элементов ВЛ и оценка их надежности в зависимости от метеорологических условий региона сооружения ВЛ.

Разработка аппаратно-программного комплекса также включает в себя создание пользовательского интерфейса, позволяющего заносить результаты осмотров ВЛ непосредственно в сам программный комплекс, формируя актуальную расчетную модель сети.

### **Литература**

1. **Крюков К.П.**, Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. Л., «Энергия», 1970.
2. **РД 34.20.504-94.** Типовая инструкция по эксплуатации линий электропередачи напряжением 35-800 кВ. М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2003.

## **Секция 6**

### **Конечное потребление энергии**

научный руководитель –  
директор НИО НЦ «Износостойкость», д.т.н.

**А.В. Рыженков**

*А.П. Болтунов, С.П. Васильев, В.И. Карпенко, студенты; рук-ли А.А. Волошин, к.т.н.; Е.А. Волошин (НИУ «МЭИ»)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ И ВНЕДРЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ АЛГОРИТМОВ В МИКРОГРИД-СЕТЯХ**

Рост числа используемых интеллектуальных устройств Интернета вещей (IoT) бытового применения, а также принятый курс на цифровизацию распределительных сетей ставят во главу угла необходимость в организации процессов цепи сбора, хранения, обработки и анализа огромного объема данных, получаемых в реальном времени от цифровых измерителей и датчиков. Использование результатов их анализа позволяет значительно повысить эффективность функционирования не только отдельных устройств, но и всей микрогрид-сети в целом, однако, нарушение в работе любого узла на каждом этапе работы с данными может привести к отказу функционирования информационной системы, обеспечивающей управление всем микрогридом. [1]

Поскольку концепция микрогрид-сетей предполагает использование распределенных энергетических ресурсов, наиболее целесообразным решением для организации информационной инфраструктуры такого типа объектов является применение распределенных вычислительных систем и накопителей информации.

Такой подход предполагает создание вычислительной системы с установкой вычислительных узлов потребителя и объединением их в общую локально-вычислительную сеть таким образом, что обработка и хранение данных каждого пользователя производится параллельно несколькими узлами. Это позволяет обеспечить высокий уровень отказоустойчивости всей системы, так как при отказе одного узла его работа будет распределена между остальными с учетом их вычислительной мощности и загруженности, а пользователь в свою очередь, будет проинформирован о необходимости проведения ремонта или замены отказавшего оборудования [2].

### **Литература**

1. **Т. Н. Yang Zhang.** Big data analytics in smart grids: a review // Energy Informatics - 2018 - № 1:8
2. **W. A. Ehanda Shwe** // A Fault Tolerant Approach in Cluster Computing System: ECTI-CON – 2008

*А.М. Кошелева, студ., А.Ю. Лихаева, И.Д. Калякин, аспиранты; рук-ли:  
И.А. Султангузин, д.т.н., проф., Ю.В. Яворовский, к.т.н., доц. (НИУ  
«МЭИ»)*

## **ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ «УМНОГО» РАЙОНА**

Результаты расчета с использованием программного пакета PHPP и классический расчет теплопотерь через ограждающие конструкции показали, что тепловые потери исследуемого учебного корпуса М НИУ «МЭИ» составили 540 кВт. На окна приходится до 50% потерь. Схожие результаты показал расчет тепловых потерь корпуса С НИУ «МЭИ». Наибольшая экономия тепловой энергии появляется при замене существующих окон на новые с термическим сопротивлением  $> 1 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$ .

В ходе капитального ремонта с заменой окон, устройства автоматизированного узла управления системой отопления и установкой термостатов на отопительных приборах достигается снижение удельного расхода тепловой энергии системой отопления зданий за отопительный период на 41% [1].

Новым шагом модернизации зданий является проработка системы вентиляции. При использовании систем рекуперации тепла воздух-воздух и повышения теплозащитных характеристик окон потенциальная экономия энергии достигает 62% [2].

Во всех помещениях корпусов необходимо обеспечивать оптимальные параметры внутреннего воздуха с наименьшими энергозатратами. Эту функцию выполняют контроллеры, регулирующие отопление и вентиляцию в зависимости от потребности. Таким образом могут быть обеспечены оптимальные условия для проведения учебных занятий даже при максимальном количестве людей в помещениях.

Появление системы вентиляции увеличивает общую нагрузку на систему электроснабжения. Для повышения класса энергоэффективности зданий и покрытия потребностей здания в первичной энергии, предлагается использовать возобновляемый источник энергии – солнце.

### **Литература**

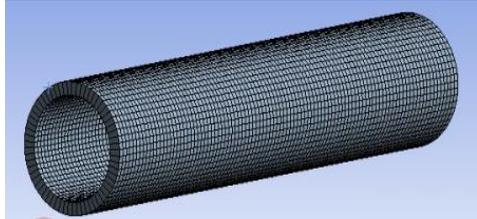
1. **Ю.А. Табунщиков**, В.И. Ливчак «Пути повышения энергоэффективности эксплуатируемых зданий» АВОК №5`2009
2. **О. Irulegi**, A. Serra, R. Hernández «Стратегии модернизации образовательных зданий с нулевой энергией» Energy and Buildings June 2017, Pages 387-400
3. **ГОСТ 30494-2011** «Здания жилые и общественные»

*П.К. Лентяев, студ.; рук. А.В. Рыженков, д.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДА С МНОГОУРОВНЕВЫМ РЕЛЬЕФОМ

В современном мире на транспортировку различных материалов и энергоносителей тратится огромное количество энергии, в связи с этим актуальной задачей является повышение эффективности трубопроводных систем. Затраты энергии при транспортировке определяются величиной гидравлического сопротивления, и для его снижения необходимо улучшать характеристики трубопроводов и насосного оборудования.

Одним из перспективных направлений по повышению эффективности трубопроводных систем является создание на внутренних поверхностях микрорельефа и его гидрофобизация. Исследования микро и нано каналов с ультрагидрофобными поверхностями показывают, что в лабораторных условиях снижение гидравлического сопротивления канала достигает 98%, при этом наблюдается эффект проскальзывания жидкости на поверхности [1]. Необходимо отметить, что такой эффект получен, исходя из определения угла скатывания капли жидкости с исходной поверхности и после ее модификации.



**Рис. 1. Расчетная сетка для расчета трубопровода.**

Актуальной задачей на сегодняшний день является моделирование подобных поверхностей с использованием программных пакетов, что позволит сократить объём достаточно дорогостоящих экспериментальных исследований. Необходимо отметить, что в мире этот вопрос в полной мере не решен. Вследствие этого была поставлена задача провести компьютерное моделирование течения жидкости в трубопроводе с многоуровневым рельефом (рис 1) с целью определения коэффициента потерь давления, качественной картины течения, векторного поля скоростей, профиля скорости в трубе с использованием программного комплекса ANSYS[2].

### Литература

1. **Vahid Mortazavi**, M.M.Khonsari On the degradation of superhydrophobic surfaces: A review // *Wear* 2017, P.145-157
2. **А.Н. Роголев**, С.К. Осипов, О.В. Злышко, А.С. Зонов Моделирование течений жидкостей и газов в среде ANSYS – М.: Цифровичок, 2019. – 60 с.

*Е.С. Трушин, студ.; А.И. Бартнев, И.Д. Калякин, аспиранты;  
рук-ли И.А. Султангузин, д.т.н., проф., Ю.В. Яворовский, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭЦ Г.МОСКВЫ**

Теплоснабжение города Москвы осуществляется от теплоэлектростанций (ТЭЦ) и котельных. Производство тепловой и электрической энергии на источниках теплоснабжения имеет побочный эффект в виде выброса загрязняющих веществ в атмосферу. Основными же источниками загрязнения воздуха в городе Москве являются автотранспорт и промышленные объекты. Суммарные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу объектов теплоэнергетики ПАО «Мосэнерго» и ПАО «МОЭК» за 2018 год составили 30757 тонн, включая выбросы твердых, жидких и газообразных веществ, что составляет порядка 5% от их общего объема [1].

При уменьшении выработки тепловой энергии на котельных и дополнительной загрузки ТЭЦ, уменьшается потребление топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в городе Москве. Перевод котельных в пиковый режим (доля выработки 10%) позволяет снизить потребление ТЭР на 3 млн. т.у.т. в год. Снижение потребления топливно-энергетических ресурсов приведет к снижению выбросов вредных веществ в атмосферу примерно на 4000 тонн.

Одним из перспективных направлений развития энергетики является использование парогазовых установок (ПГУ) и газотурбинных установок (ГТУ). Объем ввода ПГУ и ГТУ в Единую Энергетическую Систему России к 2025 году составит 12,8 ГВт, к 2035 году – 43,5 ГВт. Увеличение мощности к 2025 году на 1,0 ГВт прогнозируется путем замены действующих ТЭЦ и 7,6 ГВт за счёт ввода новых теплоэлектростанций [2].

Необходимо проанализировать методики и подходы для оценки величин экономии топлива при переводе котельных в пиковый режим и увеличении производства тепловой, электрической энергии на парогазовых установках.

### **Литература**

1. Доклад о состоянии окружающей среды в Москве в 2018 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.dpioos.ru/eco/ru/report\\_result/o\\_452195](http://www.dpioos.ru/eco/ru/report_result/o_452195) – Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ за 2018 год. – (Дата обращения: 20.09.2019).
2. Перспективы использования ГТУ и ПГУ в энергетике России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.eriras.ru/files/200916-veselov-perspektivy\\_pgu\\_gtu\\_fin.pdf](https://www.eriras.ru/files/200916-veselov-perspektivy_pgu_gtu_fin.pdf) – (Дата обращения: 25.09.2019).

## **Секция 7**

### **Аккумуляция энергии**

научный руководитель –  
профессор, д.т.н. **А.В. Волков**

**С.А. Вольнов, студ.; рук. А.В. Волков, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)**  
**ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОНОМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**  
**В ПЕРИОДЫ ПИКОВЫХ НАГРУЗОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ**  
**ГАЭС БАШЕННОГО ТИПА**

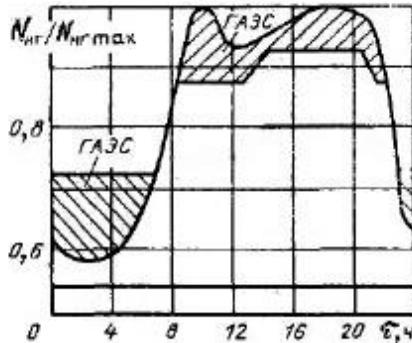
С развитием энергетики из возобновляемых источников неизбежно встаёт проблема неравномерности её выработки и потребления. Особо остро данный вопрос проявляется у децентрализованных потребителей. В данной работе предлагается решение этой проблемы путём внедрения гидроаккумулирующих электростанции (ГАЭС) башенного типа. Успешно проведена разработка ГАЭС малой мощности (до 100 кВт) на основе существующих водонапорных башен для энергоснабжения децентрализованных локальных потребителей.

**Технические характеристики:**

- Геометрический напор 13÷17 м;
- Объём резервуаров 25 м<sup>3</sup>;
- Мощность 1,04 кВт;
- Время разрядки/зарядки 1 час;
- Диаметр водовода 100 мм.

Неравномерность потребления электрической нагрузки децентрализованными потребителями характеризуется большим коэффициентом неравномерности (рис. 1). Мини-ГАЭС оптимизированы для компенсации как пиковых нагрузок, так и пиковых провалов энергопотребления автономных потребителей. На разработанном прототипе мини-ГАЭС будут проводиться эксперименты по оптимизации режимов работы ГАЭС в зависимости от:

- условий подключённой энергетической сети (виды нагрузок);
- источников электроэнергии (солнечные, ветровые, традиционные);
- климатических условий (температура, влажность, давление) и проч.



**Рис.1 Роль ГАЭС в компенсации пиков**

**Литература**

1. **Dr. Nicolas Crettenand** «Интеграция мини и малой гидроэнергетики в Швейцарии: определяя организационную структуру» - *ÉPFd Lausanne*, 2012

*В.А. Лукин, студ.; рук. Е.В. Позняк, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ»)*

## УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТА ГАЭС БАШЕННОГО ТИПА

Цель исследования – уточнение модели водонапорной башни гидроаккумулирующей электростанции башенного типа [1-2] в ходе проектных расчетов и изменившихся требований к проекту.

В связи с изменившимися требованиями к проекту были уточнены геометрические параметры модели: объем резервуара уменьшен со  $100 \text{ м}^3$  до  $25 \text{ м}^3$ , высота опор снижена с 27 м до 15 м. Изменения привели к необходимости создания новой конечно-элементной модели конструкции и проведения повторных проектных расчетов в соответствии с [3-5]. Проектные расчеты включали подбор геометрических параметров опасных сечений конструкции при действии нагрузки от собственного веса конструкции и технологической нагрузки.

На данном этапе были решены следующие задачи:

1. Подбор геометрических параметров сечений расчетной конечно-элементной модели для обеспечения прочности и жесткости конструкции при действии собственного веса и технологических нагрузок.
2. Определение собственного спектра конструкции для новых геометрических параметров сечений расчетной модели.
3. Проведение серии проверочных расчетов модели ГАЭС башенного типа на прочность, жесткость и устойчивость при действии технологических и климатических нагрузок в соответствии с [4-7].

### Литература

1. **Журба М.Г.**, Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений, Т. 1. — М.: Изд-во АСВ, 2003.
2. **Скачков С.В.**, Шуцкий С.В. Расчет стенки водонапорной башни цилиндрического резервуара на прочность и устойчивость // Инженерный вестник Дона. 2017. №4.
3. **СНиП 2.01.07-85\*** «Нагрузки и воздействия». – М., 2016.
4. **СП 53-102-2004** «Общие правила проектирования стальных конструкций», М., 2005.
5. **СП 16.13330.2017** "Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*"
6. **Катюшин В.В.** Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения. – М.: Стройиздат, 2005
7. **Мандриков А. П.** Примеры расчета металлических конструкций: Учебное пособие. Издательский дом «Лань», 2012.

*П.Д. Иванов, студ.; рук. И.А. Пуцылов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*  
**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА СИНТЕЗА  
АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА ЛИТИЕВОГО АККУМУЛЯТОРА**

Проблемы энергосбережения и рационального природопользования являются актуальными для современного общества, в связи с чем выбор новых высокоэнергоемких материалов для литиевых источников тока и оптимизация их синтеза является важной задачей. К одним из таких материалов относится литированный фосфат ванадия  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ , обладающий высоким значением рабочей области потенциалов от 4,8 до 3,5В и высокой удельной емкостью до 197 мА\*ч/г. Сегодня данный материал синтезируют твердофазным методом путем длительной высокотемпературной обработки (десятки часов) предварительно смешанных порошков прекурсоров.

В настоящей работе предложен оригинальный способ синтеза  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  включающий стадию механоактивации прекурсоров. Исходные смеси порошкообразных  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  (аммоний дигидрофосфат) и  $\text{V}_2\text{O}_3$  (оксид ванадия) квалификации х.ч. готовили перемешиванием в ступке. На 1-й стадии синтеза проводили термообработку смеси  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + 40\% \text{V}_2\text{O}_3$ . На 2-й стадии к полученному продукту добавляли  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  и продолжали термообработку. Механоактивацию прекурсоров проводили на аппаратуре высокого давления типа наковален Бриджмена. Обработку осуществляли на первой, второй или обеих стадиях. Прессование проводили при комнатной температуре на наковальнях из твердого сплава ВК6 с диаметром рабочих поверхностей наковален 15 мм, давление составляло 1.7 ГПа при угле поворота 300°. Полученные смеси отжигали на первой и второй стадии при температурах от 385 до 700 °С в течение 5 - 10 ч в муфельной печи в аргоновой атмосфере. В процессе синтеза использовали термогравиметрический и рентгенофазовый анализы.

Было установлено, что механоактивация прекурсоров эффективно действует на второй стадии синтеза литий-ванадий фосфата: наибольшее количество  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  (около 90%) наблюдается в образце, термообработанном при 700 °С в течение не более 10 часов, при получении которого пластическое деформирование применяли только перед 2-й стадией термообработки. Отжиг образцов при более высоких температурах и продолжительности не приводил к сколь-нибудь заметным отличиям в структуре полученных образцов. Из работ других авторов известно, что литий-металл фосфаты образуются при длительном (20-25 часов) многостадийном синтезе при конечной температуре 700- 800°С. Таким образом, использование пластического деформирования под высоким давлением в процессе синтеза литий-ванадий фосфата позволяет снизить длительность и энергозатратность процесса.

*Е.А. Кущенко, студ.; Е.П. Курбатова, к.т.н.;  
рук. П.А. Курбатов, д.т.н., проф. (НИУ «МЭИ»)*

## **СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ВТСП ЛЕНТЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ**

Применение современных высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов широко исследуется и является перспективным направлением в электротехнике и электромеханике [1,2]. Возможность создания пассивной устойчивой левитации вызывает большой интерес в области бесконтактных магнитных подшипников. ВТСП позволяют существенно уменьшить энергетические затраты в магнитных подвесах, а также повысить их надежность. Однако, объемные керамические ВТСП материалы, используемые в настоящее время, имеют ряд недостатков, связанных с технологией их изготовления, что осложняет процесс их внедрения.

Задачами представляемой работы являлись экспериментальные и теоретические исследования силовых характеристик ВТСП образцов при взаимодействии с постоянными магнитами. Компьютерное моделирование проводилось в программе численного анализа трехмерных электромагнитных полей EasyMag3D. Полученные данные являются основными параметрами, позволяющими оценить эффективность работы ВТСП элементов в магнитных подвесах.

В докладе представлено сравнение левитационных свойств объемных ВТСП и объемных сверхпроводящих элементов, изготовленных из слоев ВТСП ленты 2-го поколения. Сформулированы выводы об эффективности замены объемных ВТСП на элементы из ВТСП ленты для дальнейшего использования в магнитных подвесах. Представлены результаты предварительного выбора типа магнитных подшипников для создания магнитного подвеса, а также определены требования к параметрам жесткости ВТСП подшипника для обеспечения стабильной работы кинетического накопителя энергии.

### **Литература**

1. **F. N. Werfel et al.** Technical Progress in HTS Magnetic Bulk Application Development. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, vol. 25, no. 3, pp. 1-4, Art no. 3600304.
2. **В.А. Матвеев**, В.А. Маевский, В.В. Асеев, А.С. Ивлев, М.А. Сысоев. Применение объемных высокотемпературных сверхпроводников в перспективных космических системах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана Сер. «Приборостроение», 2016, №1, стр. 15-32.

## **Секция 8**

### **Цифровизация электроэнергетики**

научный руководитель –  
доцент, к.т.н. **Р.Р. Насыров**

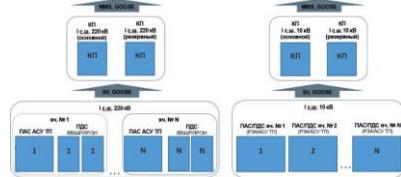
*О.Б. Вареникова, студ.; рук. С.В. Белоусов, к.т.н., доц.,  
конс. Д.И. Ковалев (НИУ «МЭИ»)*

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА, ОСНОВАННАЯ НА ТЕХНОЛОГИЯХ И ПРИНЦИПАХ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ, ДЛЯ КОНТРОЛЛЕРОВ ПЕРВИЧНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.**

Сегодня развитие получила технология «Цифровая подстанция» (ЦПС). Основными задачами являются: подбор оптимального решения по внедрению технологии ЦПС, поиск технических решений, позволяющих получить преимущества и обеспечить экономический эффект в сравнении с традиционными технологиями автоматизации и защиты в электросетевом распределительном комплексе, не теряя надежность системы.

Существуют две архитектуры ЦПС. Централизованная архитектура реализует функцию защиты, управления, измерения и т.д. для распределительного устройства или подстанции в целом в одном вычислительном устройстве (сервере) с резервированием. Децентрализованная архитектура предполагает сохранение традиционной структуры систем защиты и управления – отдельное устройство отвечает за отдельную функцию.

Кластерная архитектура занимает промежуточное положение. Цифровой кластер — сегмент ЦПС, характеризуемый объединением определенного набора функций в виде программно-реализованных цифровых устройств (IED), запускаемых на общей аппаратной платформе с необходимой степенью резервирования. В нем могут быть объединены как несколько присоединений, например, секция шин для выполнения функций РЗА и АСУ ТП, так и подстанция целиком, для выполнения определенной функции. Для реализации подсистемы АСУ ТП (Рис. 1.) с заданным уровнем надежности оптимальным будет являться объединение на одном цифровом устройстве функций контроллера присоединения для нескольких ячеек. Объединение возможно как по секциям шин, так и по распределительному устройству в целом. Для надежности функционирования необходимо обеспечить резервирование группового цифрового устройства АСУ ТП уровня присоединения его точной копией, но в отличие от основного и резервного цифровых устройств РЗА, основное и резервное цифровые устройства АСУ ТП должны работать в режиме горячего резервирования (Hot Standby) - основное устройство в работе, резервное «спит».



**Рис. 1. Структурная схема уровней процесса и присоединения цифровой АСУ ТП**

**Литература**

1. Положение ПАО «Россети» о Единой технической политике в электросетевом комплексе.

*А.А. Иванов, А.К. Рожков, студенты; рук-ли Я.Л. Арцишевский, к.т.н.,  
доц. А.А. Волошин, к.т.н., конс. Б.А. Сафронов  
(НИУ «МЭИ»)*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПЕРСОНАЛА ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

На кафедре “Релейная защита и автоматизация энергосистем” НИУ “МЭИ” разрабатывается специализированный программно-технический комплекс (ПТК), способный обеспечить оперативный персонал информацией о состоянии основного и вторичного оборудования объекта в режиме реального времени при нахождении вне своего автоматизированного рабочего места.[1]

На необслуживаемых подстанциях ПТК дает возможность быстрее адаптироваться командированному персоналу на подстанции (ПС), подгружая необходимые карты объекта, схемы ПС и характеристики оборудования, тем самым помогая сориентироваться при работе на незнакомом объекте.

К числу положительных аспектов использования ПТК также относится возможность обучения электротехнического персонала и контроль последовательности операций.[2]

В работе рассматриваются два метода автоматизации процесса обучения. Первый вариант - с помощью заранее обученного каскада. В этом методе процесс создания положительной выборки изображений происходит автоматически при определении триггеров – примитивов, расположенных с четырех сторон объекта. Второй способ – программный. В этом способе создание положительных примитивов происходит автоматически с помощью определённого программного скрипта (с указанием углов вращения, угла обзора и т.д) библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Данный метод позволяет сделать требуемое количество положительных примитивов, но не обладает требуемой точностью.

Кроме того в работе рассмотрено применение нейронных сетей для детектирования объектов энергетики, оценена их эффективность, качество и возможность интеграции в ПТК на Android устройства.

### **Литература**

1. Система информационного обеспечения персонала ЦПС на базе технологий дополненной реальности. <http://gridology.ru/projects/106>
2. Сафронов Б.А, Волошин А.А, Волошин Е.А. Система информационной поддержки персонала объектов электроэнергетики на базе технологий дополненной реальности //Международная выставка и конференция: «Релейная защита и автоматика энергосистем 2017» Санкт-Петербург.

*О.С. Орлов, студ.; рук. Р.Р. Насыров, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОЦЕНКА ОПЕРАТИВНОЙ НАДЕЖНОСТИ ПОДСТАНЦИИ**

Ошибки оперативного персонала на энергообъектах приводят к нарушению энергоснабжения потребителей и к экологическим проблемам. Наиболее известный инцидент, повлекший за собой большой урон для окружающей среды – это авария на Чернобыльской АЭС [1]. Поэтому необходимо сопровождение и контроль действий оперативного персонала.

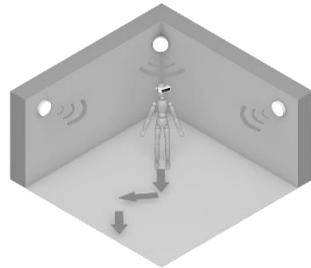
Целью проекта является разработка технологических решений для создания цифрового помощника, с помощью которого оперативный персонал сможет безаварийно производить переключения на энергообъекте. В рамках проекта планируется использовать технологию AR (дополненная реальность), благодаря которой человеку будут выводиться подсказки с полным алгоритмом действий в режиме реального времени. В отличие от технологии VR (виртуальная реальность), которая может использоваться только в качестве тренажера, технология AR позволит оперативному персоналу решать проблемы на месте проведения работ в реальном, а не виртуальном мире [2].

Практическое применение разработанных в рамках проекта технологических решений путем создания цифрового помощника будет способствовать:

- повышению безопасности работы на опасных участках объектов электроэнергетики;
- повышению эффективности труда;
- контролю работы персонала.

Помимо использования на энергообъектах, технология может быть использована при решении самого широкого спектра задач, связанных с позиционированием и контролем людей, транспорта, грузов и объектов.

За основу разработки будут использованы существующие решения в области геопозиционирования и 3D моделирования.



**Рис. 1. Принцип работы проекта**

### **Литература**

1. Дятлов А.С. Чернобыль. Как это было, 2005. – 191 с.
2. habr [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/419437/>, свободный – (10.10.2019.).

## **Секция 9**

### **Технологии индустрии 4.0**

научный руководитель –  
начальник ОТТ УИД, к.т.н. **И.И. Комаров**

*С.В. Муссаева, студ.; рук. А.Н. Рогалев, д.т.н., доц.,  
конс. С.К. Осипов, к.т.н.  
(НИУ «МЭИ»)*

## **ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ ТЭС**

На этапе концептуального проектирования наукоемкой продукции используются САD и САЕ системы информационной поддержки ее жизненного цикла. САD системы позволяют создавать трехмерные модели оборудования, а САЕ – выполнять виртуальные эксперименты по исследованию протекающих в них физических процессов. Одной из основных проблем применения инструментов САЕ систем является отсутствие достоверной информации о применимости и адекватности входящих в их состав расчетных методов и моделей [1].

Основной задачей, решаемой в рамках данной работы, является определение настроек для моделирования течений в наиболее часто встречающихся в элементах оборудования конфузورных и диффузорных каналах. Предварительные результаты проведенных расчетов показали, что при моделировании течения в конфузорном канале при  $Re = 10^5$  для обеспечения требуемого уровня погрешности необходимо использовать k-ε модель турбулентности, при величине глобальной ячейки, составляющей 10% от минимального сечения канала, и параметре  $Y^+ = 10 - 25$ . Применение выявленных параметров моделирования для диффузорного канала, степень расширения которого равнялась степени сужения конфузорного канала, привело к увеличению погрешности численного эксперимента до 20%, что обусловлено наличием отрыва потока от стенок диффузора и неприменимости выбранной модели турбулентности для численного моделирования такого типа течений.

Для снижения дополнительных потерь давления в каналах, обусловленных отрывом потока, различные авторы предлагают устанавливать в пограничную область продольные ребра. Для экспериментального подтверждения эффективности этого решения для диффузорных каналов будет разработан экспериментальный стенд и будут проведены физические испытания. На базе полученных результатов планируется проведение верификации расчетной модели и выявление критериев моделирования для нового оребренного диффузора. Выполнение данной работы позволит в перспективе создать часть базы данных настроек инструментов численного моделирования при решении задач энергомашиностроения.

### **Литература**

1. **Jiri Blazek.** Computational fluid dynamics. Germany: Elsevier, 2018.

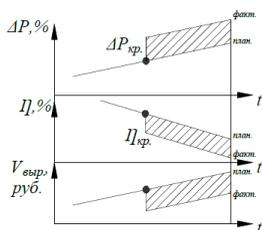
*А.Н. Павлов, студ.; рук. В.П. Соколов, д.т.н., проф.;  
конс. А.Н. Вегера (НИУ «МЭИ»)*

## ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ТЭС

Современные системы АСУ ТП позволяют проводить мониторинг показателей работы энергетических объектов и оповещают персонал в случае критических скачков в работе оборудования, однако, незначительные отклонения в показаниях могут быть проигнорированы, что может привести к развитию негативных факторов и впоследствии к аварии.

Разработка Цифрового двойника ТЭЦ, своевременно выявляющего малые отклонения рабочих параметров путем сравнения показателей с эталонными значениями, позволит вовремя отследить развитие негативных факторов и предотвратить возможные крупные финансовые потери [1].

Например, в результате эрозионного воздействия произошло смещение



**Рисунок 1 – изменение КПД,  $\Delta P$  и дополнительных финансовых потерь с течением времени в КВОУ.**

с креплений фильтрующих панелей в системе воздухоподготовки блока 2 Новокуйбышевской ТЭЦ-1. Из-за чего произошло увеличение потерь давления в КВОУ на 0,5%, приведшее к снижению КПД компрессора на 1%. Неисправность была замечена и устранена лишь в ходе планового обслуживания спустя 2 месяца работы. Общий КПД блока снизился на 1,5%. Финансовые потери составили по расчетам 21 млн рублей [2]. На рисунке 1 представлен график дополнительных финансовых потерь, вызванных неисправностью

На созданной всережимной модели будет произведена отработка встречающихся дефектов воздухоподготовительного тракта. Результаты моделирования, заложенные в ЦД, позволят по незначительным отклонениям показателей работы КВОУ сделать вывод о вероятной неисправности оборудования и предупредить персонал о необходимости проверки конкретного узла, тем самым избежав долгосрочных финансовых потерь от снижения КПД.

### Литература

1. **Пронина Е. В.** Цифровой двойник в современном производстве //Scientific perspectives 2018. – 2018. – С. 58-60.
2. **Бром А.Е., Белов О.В.,** Модель стоимости жизненного цикла энергетического оборудования //Гуманитарный вестник. – 2013. – №. 10. – С. 8.

*Е.М. Тябут, студ.; рук. А.В. Рыженков, д.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*  
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В СИСТЕМЕ  
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ЗДАНИЯ**

В настоящее время одним из ключевых направлений в вопросе энергосбережения является повышение энергетической эффективности зданий путём сокращения потребления энергии.

Комбинированное использование традиционного источника теплоты с таким оборудованием, как солнечные коллекторы и геотермальные тепловые насосы, позволяет снизить потребление тепловой энергии от традиционного источника в 3-5 раз, а также повысить энергетическую эффективность здания до 50%.

Целью данного исследования является определение эффективности использования ТНУ в системе теплоснабжения отдельно стоящего здания с учетом территориальных особенностей его расположения.

Системы, использующие тепловые насосы для обеспечения отопления и охлаждения зданий, обладают высоким потенциалом энергосбережения. Геотермальные тепловые насосы имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при внедрении данного вида установки в систему энергоснабжения здания, например, геологические особенности грунта, взаимное влияние скважин друг на друга, снижение температурного потенциала грунта в отопительный период, который можно восстановить в результате использования геотермальных скважин для пассивного охлаждения летом. Наиболее распространённым применением тепловых насосов с грунтовым источником тепла являются вертикальные скважинные теплообменники [1].

В рамках исследований подобных систем основное внимание уделяется оптимизации их производительности. Таким образом, большой интерес вызывает создание имитационной модели, позволяющей определить оптимальный режим работы в зависимости от внешних климатических и временных факторов, а также планировать выработку теплоты с учётом статистических данных, собранных за последние несколько лет [2].

### **Литература**

1. **Saqib Javed**. Thermal Modelling and Evaluation of Borehole Heat Transfer: the-sis for the degree of doctor of philosophy. - Building Services Engineering Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2012.

2. **Hirushie Karunathilake**, Kasun Hewage, Joshua Brinkerhoff, Rehan Sadiq. Optimal renewable energy supply choices for net-zero ready buildings: A life cycle thinking approach under uncertainty - Volume 201, 15 October 2019, Pages 70-89 – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.0>