

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**КАФЕДРА ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ**

**МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ**  
**«БРЕСТОБЛГАЗ»**

# **ES&ES-2023**

**«Эффективность инженерных систем  
и энергосбережение»**  
**(«Efficiency of engineering systems  
and energy saving»)**

**Сборник статей**  
**международной научно-практической конференции**

**19–20 октября 2023 года**

**Брест 2023**

УДК 62-6 (62-9) (697)  
ББК 31.19(4 Бей) я 431  
Э 94

**Рецензенты:**

*Гагарин В. Г.*, д. т. н., профессор, член-корреспондент РААСН, главный научный сотрудник НИИСФ РААСН, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (Москва, Россия).

*Уляшева В. М.*, д. т. н., профессор, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (Санкт-Петербург, Россия).

**Редакционная коллегия:**

*Председатель Новосельцев В. Г.* – к. т. н., доцент, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции БрГТУ (Брест, Беларусь).

*Заместитель председателя Шпендик Н. Н.* – к. г. н., доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции БрГТУ (Брест, Беларусь).

*Члены редакционной коллегии: Лукаша В. В.* – к. т. н., доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции БрГТУ (Брест, Беларусь); *Митлошук М. А.* – начальник редакционно-издательского отдела БрГТУ (Брест, Беларусь);

*Новосельцева Д. В.* – к. т. н., доцент, доцент кафедры природообустройства БрГТУ (Брест, Беларусь); *Шешко Н. Н.*, к. т. н., доцент, начальник научно-исследовательской части БрГТУ (Брест, Беларусь).

Э 94      **Эффективность инженерных систем и энергосбережение:** сборник статей международной научно-практической конференции, Брест, 19–20 октября 2023 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет; под ред. В. Г. Новосельцева [и др.]. – Брест : Издательство БрГТУ, 2023. – 174 с.

Сборник научных статей включает результаты исследований в области инженерных систем и энергосбережения. Материалы статей конференции будут полезны для ученых и специалистов практиков в области повышения эффективности инженерных систем зданий различного назначения, энергосбережения в инженерных системах и организации рационального использования энергии, а также для студентов и аспирантов.

УДК 62-6 (62-9) (697)  
ББК 31.19(4 Бей) я 431

ISBN 978-985-493-601-7

© Издательство БрГТУ, 2023

# ОПЛАТА ТРУДА И ОРГАНИЗАЦИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРЕДПРИЯТИИ

*О. С. Глинская*

Экономист II категории сектора организации труда и заработной платы планово-экономического отдела финансово-экономического управления, УП «Брестоблгаз», Брест, Беларусь, olya\_glinskaya@mail.ru

## **Аннотация**

Разработка системы материального и морального стимулирования работников в соответствии с их трудовым вкладом играет немаловажную роль в экономии и рациональном использовании топливно-энергетических и материальных ресурсов предприятия.

**Ключевые слова:** энергосбережение, оплата труда, целевые показатели, эффективность труда, материальное стимулирование работников.

## **REMUNERATION OF LABOR AND ORGANIZATION OF RATIONAL USE OF ELECTRICITY AT THE ENTERPRISE**

*O. S. Glinskaya*

## **Abstract**

The development of a system of material and moral incentives for employees in accordance with their labor contribution plays an important role in saving and rational use of fuel, energy and material resources of the enterprise.

**Keywords:** energy saving, remuneration, targets, labor efficiency, financial incentives for employees.

**Введение.** В современном мире цены на потребляемую человечеством электрическую энергию растут, а экологическая обстановка в мире становится только хуже. Научно-технический прогресс не стоит на месте и достигает новых вершин. Однако существуют проблемы, угрожающие самому существованию человечества. Таковы, например, угроза ядерной катастрофы, социально-экономические кризисы, экологические последствия техногенной нагрузки и т. д. Так, рост населения вызывает увеличение потребности в производстве продовольствия, следовательно, увеличивается нагрузка на энергетические ресурсы, что приводит к загрязнению окружающей среды.

Очевидно, если мы хотим сохранить планету живой и здоровой для будущих поколений, нам следует использовать энергию экономно и целесообразно.

Целью исследования является овладение знаниями, методами, необходимыми для решения проблемы нецелесообразного энергопотребления.

Задачи:

привлечь внимание к проблеме энергосбережения;

оценить эффективность энергосберегающих мероприятий;

проанализировать систему оплаты труда как один из методов экономии электроэнергии.

Предмет исследования – механизмы, формы, способы влияния системы стимулирования труда работников на показатели деятельности предприятия.

Объект исследования – система мотивации сотрудников к разумному энергопотреблению.

Методы – изучение литературы и других информационных источников. Анализ законодательства в области энергосбережения.

**Основная часть.** В Конституции Республики Беларусь законодательно закреплены права граждан на благоприятную окружающую среду и на возмещение вреда, причиненного нарушением этого права, право на охрану здоровья, в том числе право на безопасные условия труда.

Государство осуществляет контроль за рациональным использованием природных ресурсов в целях защиты условий жизни, а также охраны окружающей среды.

Государственное регулирование в сфере энергосбережения основывается на принципах:

- роста энергетической безопасности, в том числе повышения энергетической независимости Республики Беларусь;

- эффективного и рационального использования топливно-энергетических ресурсов;

- приоритетности внедрения энергоэффективного оборудования, технологий и материалов;

- научно-технической обоснованности реализуемых мероприятий и пр.

Законодательство об энергосбережении основывается на Конституции Республики Беларусь и состоит из Закона от 8 января 2015 года № 239-З «Об энергосбережении» и иных актов законодательства. Принят ряд программ социально-экономического развития, например, Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 годы, а также Директива Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3 «Экономия и бережливость – главные факторы экономической безопасности государства».

За 2022 год Республика Беларусь снизила потребление энергии на 9 %, потребление энергоресурсов – на 9,6 % по сравнению с прошлым годом. Сократить потребление энергоресурсов удалось благодаря замене устаревшего энергоемкого оборудования и реализации энергоэффективных проектов. Прежде всего снизилось неэнергетическое использование топлива на 80 % к уровню прошлого года. Использование местных видов топлива выросло до 18 %, доля возобновляемых источников энергии составила 8 %.

Основными мерами по повышению энергоэффективности и энергетической самостоятельности страны являются реализация комплекса мероприятий по энергосбережению, в том числе в рамках международных проектов, мероприятий по увеличению потребления электрической энергии во всех отраслях наци-

ональной экономики, строительство энергоисточников на местных видах топлива, в том числе ВИЭ, внедрение системы энергоменеджмента и ежегодное снижение удельных расходов ТЭР на производство продукции (работ, услуг), включая производство тепловой и электрической энергии.

И Конституция, и, более подробно, Трудовой кодекс регулируют трудовые отношения рабочих и служащих, содействуя повышению эффективности производства, укреплению трудовой дисциплины, обеспечению здоровых и безопасных условий труда. На предприятиях заключаются коллективные договоры, создаются иные локальные правовые акты, регулирующие трудовые и социально-экономические отношения между нанимателями и работниками.

В современном мире необходимым условием обеспечения вышеперечисленных нормативных актов стало обеспечение человека достаточным количеством энергии и топлива. Ограниченность энергетических ресурсов, высокая стоимость энергии, негативное влияние на окружающую среду, – все эти факторы приводят к альтернативе: разумнее снижать потребление энергии нежели постоянно увеличивать ее производство. Поэтому энергосбережение с каждым годом становится все более актуальной проблемой. Несомненно, экологическое образование и воспитание, а также привитие навыков бережного отношения человека к энергоресурсам, применение энергосберегающих технологий, использование наиболее безопасных источников энергии для окружающей среды позволяет гармонизировать совместное развитие природы и общества. Неотъемлемая часть энергосбережения на предприятии – это создание материального стимулирования работников и ответственности за выполнение поставленных задач.

В УП «Брестоблгаз» применяются повременно-премиальная и сдельно-премиальная формы оплаты труда, которые предполагают оплату не только за отработанное время, но и премирование за качество выполненной работы.

**Таблица 1** – Соотношение уровня заработной платы работников УП «Брестоблгаз» и средней заработной платы по стране за 2020–2022 годы

Наименование показателя	2020 год	2021 год	2022 год
Среднемесячная заработная плата по УП «Брестоблгаз», руб.	1454,1	1642,4	1879,9
Темп роста к прошлому году, %	107,1	112,9	114,5
Среднемесячная заработная плата в Республике Беларусь, руб.	1 250,9	1 434,4	1 630,9
Соотношение размера заработной платы работников УП «Брестоблгаз» к уровню по Республике, %	116,2	114,5	115,3

На предприятии УП «Брестоблгаз» в соответствии с законодательством Республики Беларусь разработано и утверждено Положение по оплате труда работников с целью стимулирования и повышения эффективности труда.

Кроме основного премирования работников за основные производственные показатели, производится премирование по специальным системам, согласно положениям, утвержденным приказами генерального директора предприятия: за

экономии и рациональное использование топливно-энергетических и материальных ресурсов; за сбор, хранение и сдачу лома и отходов черных, цветных и драгоценных металлов, за экономию автомобильного топлива.

Организация материального стимулирования (премирования) работников за экономию и рациональное использование топливно-энергетических и материальных ресурсов предполагает:

установление и применение технически обоснованных норм и нормативов расхода топливно-энергетических и материальных затрат на всех стадиях производства;

наличие постоянного достоверного учета расхода материальных и топливно-энергетических ресурсов, осуществляемого на основе показаний контрольно-измерительных приборов или других технических средств;

контроль за поступлением, транспортировкой, хранением и расходованием топливно-энергетических и материальных ресурсов, качеством производимой продукции, товаров (работ, услуг), соблюдением стандартов и т. д.;

разработку организационно-технических мероприятий, направленных на экономию топливно-энергетических и материальных затрат, снижение норм их расхода и обеспечение эффекта от их внедрения.

Данные положения разработаны в соответствии с законодательством (постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 31.08.2007 № 1124 «О стимулировании работников за экономию и рациональное использование топливно-энергетических и материальных ресурсов» с дополнениями и изменениями, постановлением Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь, Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 22.02.2012 № 27/13 «Об утверждении рекомендаций о моральном и материальном стимулировании работников за экономию и рациональное использование топливно-энергетических и материальных ресурсов» и прочими нормативно-правовыми актами), в целях материальной заинтересованности работников в повышении эффективности производства, его модернизации, выполнении доведенных показателей развития организации и показателей, контролируемых по системе мониторинга бизнес-плана, экономии и рациональном использовании топливно-энергетических и материальных ресурсов.

Одними из целевых показателей, контролируемых по системе мониторинга бизнес-плана, установленных для УП «Брестоблгаз», является энергосбережение, объем экономии ТЭР, целевые показатели по доле местных топливно-энергетических ресурсов в балансе котельно-печного топлива и доле возобновляемых источников энергии в котельно-печном топливе.

В таблице 2 приведены целевые показатели по энергосбережению и их выполнение за 2022 год по УП «Брестоблгаз».

Однако, размеры всех видов премий могут быть уменьшены либо работники вовсе могут быть лишены премии за невыполнение целевых показателей по энергосбережению.

Основанием для начисления и выплаты премий являются данные статистической и (или) бухгалтерской отчетности и достоверного оперативного учета,

полученные с помощью контрольно-измерительных приборов и других технических средств. Премирование осуществляется при отсутствии на предприятии задолженности по платежам за энергоресурсы.

**Таблица 2** – Установленные показатели эффективности на 2022 год и их выполнение в УП «Брестоблгаз»

Наименование показателя	Единица измерения	2022 г. план	2022 г. факт	Выполнение, %
<b>Целевые показатели</b>				
Энергосбережение	%	– 3,3	– 4,0	вып.
Объем экономии ТЭР	т. у. т.	300	365,2	121,7
Доля местных топливно-энергетических ресурсов (МТЭР) в балансе котельно-печного топлива (КПТ)	%	38	46,6	вып.
Доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в котельно-печном топливе (КПТ)	%	0,6	0,7	вып.

Средства, направляемые на премирование, распределяются между работниками с учетом выполнения конкретных заданий по экономии и рациональному использованию топливно-энергетических и материальных ресурсов.

Кроме премирования работников наниматель в целях стимулирования за разработку и реализацию эффективных мер по экономии и рациональному использованию топливно-энергетических и материальных ресурсов вправе присвоить более высокий квалификационный разряд рабочему и более высокую квалификационную категорию специалисту. При этом условия, порядок присвоения разрядов и квалификационных категорий по данному основанию, а также критерии оценки эффективности указанных мер предусматриваются в организации самостоятельно, а для рабочих, кроме того, с учетом имеющихся разрядов работ.

Конкретные показатели, условия и размеры премирования, перечень работников, подлежащих премированию, сроки выплаты премий устанавливаются в Положении о премировании работников за экономию и рациональное использование топливно-энергетических и материальных ресурсов.

Кроме материального стимулирования работников в выполнении доведенных задач, может применяться и моральное стимулирование работников путем проведения соревнований за достижение высоких показателей по экономии топливно-энергетических ресурсов среди структурных подразделений организаций.

К мерам морального стимулирования относятся:

присуждение призовых мест отдельным работникам и коллективам структурных подразделений, организаций в соревновании за экономное и рациональное использование топливно-энергетических и материальных ресурсов

и т. п.; присвоение званий «Лучший по профессии»; награждение Почетной грамотой, занесение на Доску почета, объявление благодарности и др.

Условия, конкретные показатели экономии топливно-энергетических и материальных ресурсов, энергосбережения, период подведения итогов, меры и порядок морального поощрения работников предусматриваются в локальном правовом акте.

Организацию материального и морального стимулирования работников за экономию и рациональное использование топливно-энергетических и материальных затрат рекомендуется осуществлять одновременно с техническим переоборудованием производства, введением новых высокоэффективных безотходных технологий, внедрением мероприятий по энергосбережению при условии пересмотра в установленном порядке норм расхода соответствующих видов топливно-энергетических и материальных ресурсов и ориентироваться на улучшение конечных результатов деятельности.

Ежегодно на предприятии разрабатывается и реализуется «План мероприятий по энергосбережению УП «Брестоблгаз».

**Заключение.** Эффективность энергосбережения на предприятии кроме применяемых технологических решений также зависит от работников, а мотивация сотрудников предприятия к разумному потреблению напрямую зависит от материального и морального поощрения за результаты труда. Предприятиям необходимо разрабатывать локальные нормативные акты в части поощрения сотрудников за экономию энергоресурсов.

#### **Список цитированных источников**

1. Родионова, В. Ю. Мотивация трудовой деятельности / Ю. В. Родионова // учебное пособие – Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет – 2019.
2. Смородин, С. Н. Методы энергосбережения в энергетических, технологических установках и строительстве / С. Н. Смородин, В. Н. Белоусов, В. Ю. Лакомкин // учебное пособие – Санкт Петербург : 2014.
3. Пospelова, Т. Г. Основы энергосбережения / Т. Г. Пospelова // Государственный комитет по энергосбережению и энергетическому надзору Республики Беларусь. – Минск : «Технопарк» – 2000.
4. Об утверждении Рекомендаций о моральном и материальном стимулировании работников за экономию и рациональное использование топливно-энергетических и материальных ресурсов : постановление Министерства труда и социальной защиты Респ. Беларусь и Государственного комитета по стандартизации Респ. Беларусь, 22 февр. 2012 г., № 27/13.
5. Об энергосбережении: Закон Респ. Беларусь, 8 января 2015 г., № 239-3
6. О Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 24 февр. 2021 г., № 103.

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ ПРИ ВЫБОРЕ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ НА СЕТЯХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

*А. А. Гордеев<sup>1</sup>, О. В. Пазушкина<sup>2</sup>, А. Р. Ханова<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Начальник группы ВДГО/ВКГО, ООО «Газпром газораспределение Ульяновск», студент УлГТУ, Ульяновск, Россия, gordeev@ulgaz.ru

<sup>2</sup> Доцент кафедры нефтегазового дела Инженерного факультета Международного института, УлГТУ, Ульяновск, Россия, o.pazushkina@yandex.ru

<sup>3</sup> Студент, УлГТУ, Ульяновск, Россия, khanova02@mail.ru

### **Аннотация**

При принятии управленческого решения по выбору запорной арматуры в качестве узла замены при проведении первоначального монтажа или капитального ремонта, необходимо основываться на технико-экономических расчетах для получения экономического и энергосберегающего эффекта при последующей эксплуатации газопровода.

**Ключевые слова:** запорная арматура, газовый колодец, задвижка, подземный шаровой кран в бесколодезном исполнении.

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF OPERATING COSTS WHEN SELECTING FITTINGS ON GAS DISTRIBUTION NETWORKS**

*A. A. Gordeev<sup>1</sup>, O. V. Pazushkina<sup>2</sup>, A. R. Khanova<sup>3</sup>*

### **Abstract**

When making a management decision to select an isolation valve as a replacement unit during initial installation or a major overhaul, technical and economic calculations must be based to obtain economic and energy saving effects during the subsequent operation of the pipeline.

**Keywords:** shut-off valve, gas well, gate valve, underground ball valve in well-free design.

**Введение.** Сравнительный анализ эксплуатационных затрат при выборе запорной арматуры на сетях газораспределения является важным шагом при проектировании и эксплуатации таких систем. Запорная арматура является ключевым компонентом газораспределительных сетей, обеспечивающим регулирование и контроль потока газа.

Авторами проведен сравнительный анализ различных типов запорной арматуры на основе эксплуатационных затрат. Эксплуатационные затраты включают расходы на приобретение, установку, техническое обслуживание и ремонт запорной арматуры.

Основной целью данного исследования является определение наиболее эффективного и экономически выгодного типа запорной арматуры, который обеспечивает надежную работу системы газораспределения при минимальных эксплуатационных затратах.

Материал деталей арматуры и сварные соединения, находящиеся под давлением и соприкасающиеся с рабочей средой, в пределах установленных показателей долговечности и назначенных показателей должен удовлетворять следующим требованиям [1]: обеспечивать допустимый запас прочности; обладать достаточной коррозионной стойкостью к рабочей и окружающей среде; не содержать внутренних и внешних дефектов, влияющих на безопасность.

При выборе материалов для деталей арматуры учитывают заданные условия эксплуатации: расчетное давление; минимальная температура окружающей среды; максимальная температура рабочей среды; химический состав и свойства рабочей (взрывоопасность, наличие примесей, приводящих к эрозионному износу) и окружающей среды (коррозионная активность).

Проведение сравнительного анализа эксплуатационных затрат позволяет выбрать оптимальную запорную арматуру, учитывая все вышеперечисленные факторы.

Результаты данного исследования могут быть полезными для проектировщиков и эксплуатационных специалистов газораспределительных систем при выборе запорной арматуры.

Сравнительный анализ эксплуатационных затрат позволит оптимизировать использование ресурсов и повысить эффективность работы систем газораспределения.

**Материалы и методы.** Для проведения сравнительного анализа в качестве примера были взяты объекты газораспределения, расположенные на территории Ульяновской области:

1. Проводится мониторинг состояния сетей газораспределения с газовыми колодцами и осмотр технического состояния сетей газораспределения с подземными шаровыми кранами.

2. Проводятся расчеты затрат на техническое обслуживание и технический осмотр газового колодца; затрат на техническое обслуживание и технический осмотр подземного шарового крана.

3. Сопоставляются виды работ, включающие проверку состояния газового колодца с задвижкой и подземного шарового крана в бесколодезном исполнении.

4. Определяются ежегодные затраты на технический ремонт и обслуживание одного газового колодца совместно с запорной арматурой и затраты на обслуживание подземного шарового крана в бесколодезном исполнении. Оценка затрат ведется согласно действующих расценок газораспределительной организации на территории Ульяновской области.

5. Рассчитывается годовая экономия газа  $\Delta Q_{г}$ , м<sup>3</sup>/год, объекта газораспределения по формуле

$$\Delta Q_{\Gamma} = 3,57 \cdot \tau_{\phi} \cdot 10^{-5} \cdot \eta \cdot P_{\Gamma} \cdot m \cdot V \cdot \sqrt{\frac{M}{273+t}} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot N, \quad (1)$$

где  $\tau_{\phi}$  – фактическая годовая продолжительность периода замены задвижки на шаровые краны,  $\tau_{\phi}$  принимается равной 1 ч/год;  $P_{\Gamma}$  – избыточное давление газа в системе, составляет  $0,6 \cdot 10^6$  Па;  $\eta$  – коэффициент запаса, при  $P_{\Gamma} \geq 2 \cdot 10^5$  Па коэффициент  $\eta$  равен 2;  $m$  – коэффициент негерметичности, характеризующий падение давление газа в системе,  $m$  принимается 0,001 1/ч;  $D_N$  – номинальный диаметр газопровода,  $D_N$  составляет 250 мм;  $V$  – объем газопровода между отключающими устройствами,  $V = 100,48$  м<sup>3</sup> при секционировании газопровода длиной 2000 м;  $t$  – температура газа,  $t = 20$  °С;  $\rho$  – плотность газа,  $\rho = 0,66692$  кг/м<sup>3</sup>;  $M$  – молекулярная масса газа,  $M = 16,043$  кг/кмоль;  $N$  – количество шаровых кранов, установленных в качестве запорной арматуры на газопроводе за отчетный период, составляет 37 шт/год.

6. Рассчитывается экономический эффект эксплуатации по формуле

$$\mathcal{E}_{\phi} = (Z_{\text{зад}} - Z_{\text{тик}}) \cdot N + \Delta Q_{\Gamma} \cdot \mathcal{C}, \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}_{\phi}$  – экономический эффект, руб/год;  $Z_{\text{зад}}$  – затраты на эксплуатацию задвижки, руб/год;  $Z_{\text{тик}}$  – затраты на эксплуатацию подземных шаровых кранов, руб/год;  $N$  – количество шаровых кранов, установленных в качестве запорной арматуры на газопроводе, шт;  $\Delta Q_{\Gamma}$  – годовая экономия газа, м<sup>3</sup>/год;  $\mathcal{C}$  – стоимость природного газа, на территории Ульяновской области по состоянию на 01.01.2023, руб/м<sup>3</sup>.

**Результаты и обсуждение.** Применяемая запорная арматура на сетях газораспределения должна обеспечивать допустимый запас прочности, обладать достаточной коррозионной стойкостью к рабочей и окружающей среде. Запорная арматура подбирается с учетом исключения взаимного химического воздействия при соединении различных материалов.

В соответствии с техническим паспортом газораспределительной организации ООО «Газпром газораспределение Ульяновск» по состоянию на 01.01.2023 на территории Ульяновской области находится в эксплуатации 37 задвижек диаметром 250 мм в колодезном исполнении.

В соответствии с [2] проверка состояния газовых колодцев входит в мониторинг состояния сетей газораспределения, при этом выполняются следующие работы (таблица 1):

- обход и осмотр трассы подземного газопровода;
- проверка на загазованность газовых колодцев и камер (колодцев) инженерных подземных сооружений (коммуникаций);
- техническое обслуживание отключающих устройств на подземном газопроводе;
- очистка газового колодца от грязи и посторонних предметов;
- откачка воды из газового колодца;
- проверка работоспособности затвора частичным перемещением запирающего элемента;

– оформление результатов обхода трассы газопровода.

При осмотре технического состояния сетей газораспределения с подземными шаровыми кранами выполняются следующие работы (таблица 2):

– обход и осмотр трассы подземного газопровода;

– проверка работоспособности затвора частичным перемещением запирающего элемента;

– оформление результатов обхода трассы газопровода.

**Таблица 1** – Затраты на техническое обслуживание и технический осмотр газового колодца

№	Пункт прейскуранта цен	Наименование работ	Единица	Стоимость (без НДС), руб	Количество
1	5.1.1	Обход и осмотр трассы подземного уличного газопровода	км	452	2
2	5.1.5	Проверка на загазованность газовых колодцев и камер (колодцев) инженерных подземных сооружений (коммуникаций) – лето	колодец	59	2
3	5.1.5	Проверка на загазованность газовых колодцев и камер (колодцев) инженерных подземных сооружений (коммуникаций) крышек с очисткой колодцев от снега и льда – зима	колодец	70,8	2
4	5.1.13	Оформление результатов обхода трассы газопровода	рапорт	157	2
5	5.1.23	Техническое обслуживание отключающих устройств и линзовых компенсаторов на подземном газопроводе при глубине колодца 1-3 м и диаметре задвижки 151-300 мм	задвижка	1308	1
6	5.1.33	Очистка газового колодца от грязи и посторонних предметов при глубине колодца до трех метров со смазкой арматуры	колодец	1420	1
7	5.1.35	Откачка воды из газового колодца	колодец	525	1
8	5.1.39	Проверка работоспособности затвора частичным перемещением запирающего элемента	кран, задвижка	61	2

Итого: 5823 рублей/год (с НДС)

**Таблица 2** – Затраты на техническое обслуживание и технический осмотр подземного шарового крана

№	Пункт прейскуранта цен	Наименование работ	Единица	Стоимость (без НДС), руб	Количество
1	5.1.1	Обход и осмотр трассы подземного уличного газопровода	км	452	2
2	5.1.13	Оформление результатов обхода трассы газопровода	рапорт	157	2
3	5.1.39	Проверка работоспособности затвора частичным перемещением запирающего элемента	кран, задвижка	61	2

Итого: 1608 рублей/год (с НДС)

Стоимость работ оценена в соответствии с [3]. При сопоставлении видов работ, входящих в проверку состояния газового колодца с задвижкой и подземного шарового крана в бесколодезном исполнении согласно [4], с действующими расценками газораспределительной организации на территории Ульяновской области [3, 5] определено, что ежегодные затраты на технический осмотр и обслуживание одного газового колодца совместно с запорной арматурой составляют 5823 рублей, а затраты на обслуживание подземного шарового крана в бесколодезном исполнении – 1608 рублей.

При этом возведение железобетонных колодцев и камер, необходимых для контроля и обслуживания арматуры, подразумевает значительные последующие эксплуатационные затраты на чистку и ремонт.

К недостаткам использования бетонных колодцев можно отнести: отсутствие герметичности вследствие агрессивного воздействия коррозии; смещение частей колодца из-за его подверженности циклам замерзания/оттаивания; возникновение опасности с точки зрения экологии, необходимость регулярной чистки из-за скопления различных загрязнений на стенах конструкции.

Энергосберегающий эффект при применении в качестве запорной арматуры вместо традиционных задвижек современных подземных шаровых кранов с необслуживаемыми сальниковыми камерами достигается в результате повышения герметичности системы газоснабжения и уменьшения вследствие этого эксплуатационных утечек газа.

Годовая экономия газа [6] составляет  $\Delta Q_r = 4,4 \text{ м}^3/\text{год}$ . Экономический эффект эксплуатации –  $\Delta \phi = 156 \text{ тыс.руб/год}$ .

**Закключение.** Применение подземных шаровых кранов вместо газовых задвижек в колодезном исполнении позволяет достичь значительного технико-экономического эффекта; исключить затраты на текущий ремонт и содержание и избавиться от угроз затопления и промерзания колодцев. Кроме того, применение подземных шаровых кранов вместо газовых задвижек в колодезном исполнении позволяет обезопасить своих сотрудников от работ в колодцах и камерах.

Установка подземных шаровых кранов снижает сроки монтажа и сокращает количество соединений арматуры.

### Список цитированных источников

1. СТО ГАЗПРОМ 2-4.1-212-2008 «Общие технические требования к трубопроводной арматуре, поставляемой на объекты ОАО «Газпром»: утвержден и введен в действие Распоряжением ОАО «Газпром» – от 30 ноября 2007г. № 426 / разработан Ассоциацией «Высоконадежный трубопроводный транспорт», ЗАО «Научно-производственная фирма «Центральное конструкторское бюро арматуростроения», ДООАО «Оргэнергогаз» – Москва, 2008. – 91 с.
2. ГОСТ Р 34741–2021. Системы газораспределительные. Требования к эксплуатации сетей газораспределения природного газа: межгосударственный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 октября 2021 г. № 1191-ст: введен впервые: дата введения 2022-06-01 / разработан АО «ГипроНИИгаз». – Москва: Российский институт стандартизации, 2021. – 110 с.; – Текст: непосредственный.
3. Прейскурант цен ООО «Газпром газораспределение Ульяновск» на услуги по техническому обслуживанию и ремонту систем газоснабжения на 01.01.2023: утвержден приказом ООО «Газпром газораспределение Ульяновск» от 28.12.2022 № 1095 «О прейскуранте цен на услуги по техническому обслуживанию и ремонту систем газоснабжения»/ [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ul-gaz.ru/images/docs/tovdgo/preiskurant\\_cen\\_2023.pdf](http://www.ul-gaz.ru/images/docs/tovdgo/preiskurant_cen_2023.pdf) – 74с. (дата обращения 27.06.2023).
4. СТО Газпром газораспределение 2.8. – 2013 Методика расчета эффективности энергосберегающих и инновационных мероприятий при разработке и реализации программ ОАО «Газпром газораспределение»: утвержден и введен в действие Приказом ОАО «Газпром газораспределение» от 15 апреля 2013г. № 126 / разработан ОАО «Газпром промгаз». – Санкт-Петербург, 2013. – 134 с.
5. Приказ Агентства по регулированию цен и тарифов Ульяновской области от 28.06.2022 № 43-П «Об установлении розничных цен на газ, реализуемый населению на территории Ульяновской области, за исключением розничных цен на сжиженный газ» [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/7301202206290001?index=0&rangeSize=1> (дата обращения 27.06.2023).
6. Пазушкина, О. В., Гордеев, А. А. Оценка технического состояния газопроводов / О. В. Пазушкина, А. А. Гордеев. // В сборнике: Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе. Материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых и специалистов. В 2-х томах. Тюмень, 2022. С. 204-207.

## РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ДОМЕ

*А. Я. Джумаев*

Проректор по научной работе, Государственный энергетический институт  
Туркменистана, Мары, Туркменистан, a.jumayev.tm@gmail.com

### **Аннотация**

Предлагается разработанные в Государственном энергетическом институте Туркменистана система энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и системы аккумулирования, которые прошли стадию научно-исследовательских работ, частично обеспечены конструкторской документацией и на их основе построен экспериментальный жилой дом с автономным энергоснабжением. Определена эффективность применения в разных климатических зонах Туркменистана ряда систем энергоснабжения на основе ВИЭ. Рассматриваются методы повышения эффективности энергоиспользования фотоэлектрических солнечных станций (ФСС).

**Ключевые слова:** возобновляемых источников энергии, системы аккумулирования, экспериментальный жилой дом, автономное энергоснабжение, фотоэлектрическая солнечная станция, эффективность энергоиспользования.

## RATIONAL USE OF ENERGY IN AN EXPERIMENTAL HOUSE

*A. Ya. Jumayev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Vice rector, State Energy Institute of Turkmenistan, Mary city, Turkmenistan, a.jumayev.tm@gmail.com

### **Abstract**

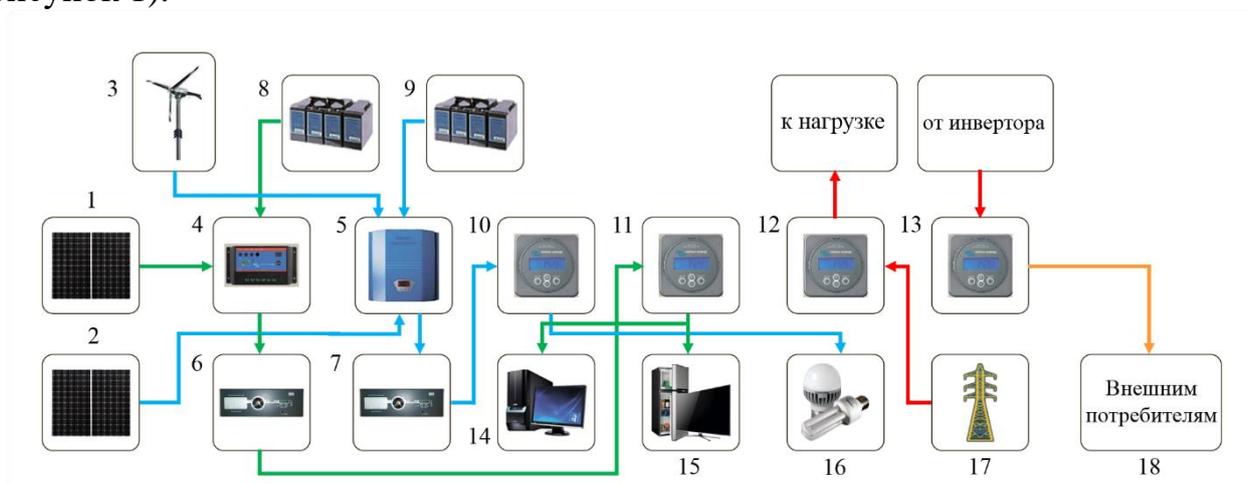
The article presents an energy system developed at the State Energy Institute Turkmenistan's based on renewable energy sources (RES) and storage systems, which have passed the stage of scientific research and testing and supplies partially with design documentation and an experimental residential building with an autonomous power supply that is built on their basis. The article also provides evidence in support of the efficiency of the use of several renewable energy-based energy supply systems in different climatic zones of Turkmenistan.

**Keywords:** renewable energy sources, storage systems, experimental house, autonomous energy supply, photovoltaic solar station, efficiency energy supply systems.

**Введение.** В Туркменистане в основном используется электроэнергия, вырабатываемая на газотурбинных станциях, работающих на природном газе и возобновляемые источники энергии приобретают все большую актуальность в связи с тем, что традиционные источники ограничены, и их использование

наносит вред окружающей среде. В нашей стране из-за огромного ресурса все большее значение приобретает солнечная энергия, которая может быть использована для получения экологически чистой электрической и тепловой энергии [1–3]. Ограниченное использование ВИЭ связано с дискретностью энергетических потоков – периодичностью поступления и изменчивостью энергетического потенциала, что во многих случаях при их применении создает существенные осложнения и не обеспечивает требуемые параметры энергоснабжения. При автономном энергоснабжении параметры ФСС выбираются для зимнего периода времени, когда поступление солнечного излучения минимальное. При этом возникает проблема неэффективного использования ФСС в летний период времени. Поэтому в некоторых случаях такая необходимость полностью оправдана. В данное время в рамках возобновляемой энергетики имеется целый ряд технических средств и методов решения этой задачи, в том числе за счет использования аккумуляторов электрической энергии. Также возникает вопрос необходимости изучения возможности использования излишка энергии, выработанной ФСС в летнее время для производства водорода, т. к. в настоящее время важным направлением развития возобновляемой энергетики является водородная энергетика, которая занимается решением проблем, связанных с применением водорода в качестве энергоносителя и аккумулирующей среды [4, 5].

**Материалы и методы.** В Государственном энергетическом институте Туркменистана разработана система энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и системы аккумулирования, которые прошли стадию научно-исследовательских работ, частично обеспечены конструкторской документацией и на их основе построен экспериментальный жилой дом с автономным энергоснабжением и с системой горячего водоснабжения [6–8]. Определена эффективность применения в разных климатических зонах Туркменистана ряда систем энергоснабжения на основе ВИЭ, наиболее перспективная из которых представлена ниже (таблица 1 и рисунок 1).



**Рисунок 1** – Структурная схема системы энергоснабжения на базе ВИЭ

**Таблица 1** – Перечень оборудования, входящего в систему энергоснабжения на базе ВИЭ

Обозначение оборудования на рис.1	Название оборудования	Тип оборудования	Параметры и количества
1	Фотоэлектрическая солнечная станция (ФСС)	Мощность 2 кВт	12 солнечных модулей с мощностью 130 Вт каждый
2			4 солнечных модулей с мощностью 130 Вт каждый
3	Ветровая электрическая станция	Мощность 2 кВт	L-2000
4	Контроллер	LB PWM 01	48 В, 60 А.
5	Гибридный контроллер	Wind/Solar Hybrid Controller	WWS20-48NOO
6	Инвертор1	5000 Вт	HZ, power inverter
7	Инвертор 2	1200 Вт, А power inverter, YGDY	Pure sine wave inverter. DC Input voltage 48V, AC Output voltage 230V, Frequency 50Hz
8	Аккумуляторные батареи (АБ)	С емкостью 200 А•ч, 12 В	4 шт. послед.соед.
9	Аккумуляторные батареи (АБ)	С емкостью 200 А•ч, 12В	4 шт. послед.соед.
10	Счетчики 1 (электроэнергии)	М <i>MAKEL</i>	М 550.2251.RS485 1шт.
11	Счетчики 2 (электроэнергии)	М <i>MAKEL</i>	М 550.2251.RS485 1шт.
12	Счетчики 3 (электроэнергии)	М <i>MAKEL</i>	М 550.2251.RS485 1шт.
13	Счетчики 4 (электроэнергии)	М <i>MAKEL</i>	М 550.2251.RS485 1шт.
14	Бытовое оборудование, компьютер	Персональный компьютер	1шт.
15	Бытовое оборудование, холодильник, телевизор	Холодильник	ORVICA Japan 1шт.
		Телевизор	TOSHIBA, power TV 1шт.
16	Энергосберегающие светильники	125 Вт	2 шт.
	Энергосберегающие светодиодные светильники	24 Вт	8 шт.
17	Центральная система энергоснабжения	Сеть 220В	
18	Внешние потребители	Уличное освещение	

Фотоэлектрическая солнечная станция и ветровая электрическая станция производят электроэнергию, которая распределяется для последующего использования с помощью блока автоматического управления режимами работы системы энергоснабжения (рисунок 1). В первую очередь проводится зарядка аккумуляторных батарей, обеспечивающих питание ламп освещения и бытового оборудования. Экспериментальный жилой дом находится на территории Государственного энергетического института в городе Мары (географические координаты: с. ш.  $37,6^0$ , в. д.  $61,8^0$ ). Предполагаемые месяцы использования – круглый год, автономный режим, время использования – ежедневно и круглосуточно, место установки солнечного коллектора, ориентированного на юг – на крыше дома с наклоном  $36^0$ .

**Результаты и обсуждение.** Проведены исследования влияния климатических условий, т. е. облачной погоды, запыленности воздуха на эксплуатационные параметры фотоэлектрической станции. Низкие энергетические характеристики солнечного излучения в зимнее время требуют завышенных мощностей преобразователей солнечной энергии, что приводит к их неэффективному использованию в летний период, т. к. в летнее время аккумуляторы заряжаются быстро и контроллер отключает процесс их зарядки. Динамика процесса зарядки аккумуляторов в летний период показана на рисунках 2 и 3. Как видно из графиков, в солнечные дни аккумуляторы быстро заряжаются и контроллер отключает процесс их зарядки. В результате эффективность использования ФСС снижается. В графиках показаны подключения нагрузки до 12.00 и после 12.00, что позволяет эффективно использовать ФСС (рисунок 2). На рисунке 3 показано, как быстро заряжаются аккумуляторы в зависимости от потребляемой энергии в ночное время. Экспериментальные данные показали, что при потреблении энергии свыше шести кВт•ч в ночное время на каждом из двух-, четырех- последовательно соединенных аккумуляторах возможно полностью эффективно использовать ФСС.

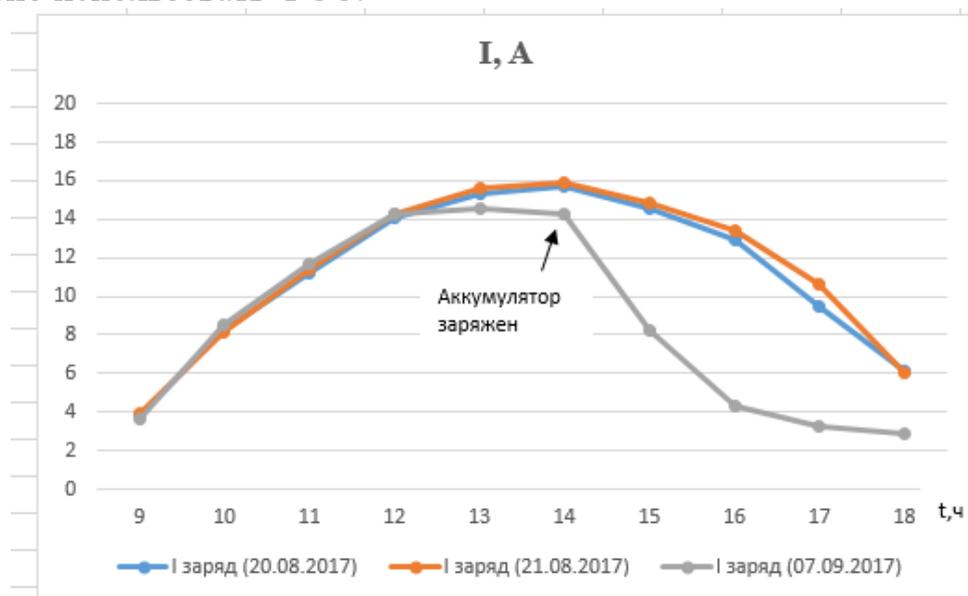
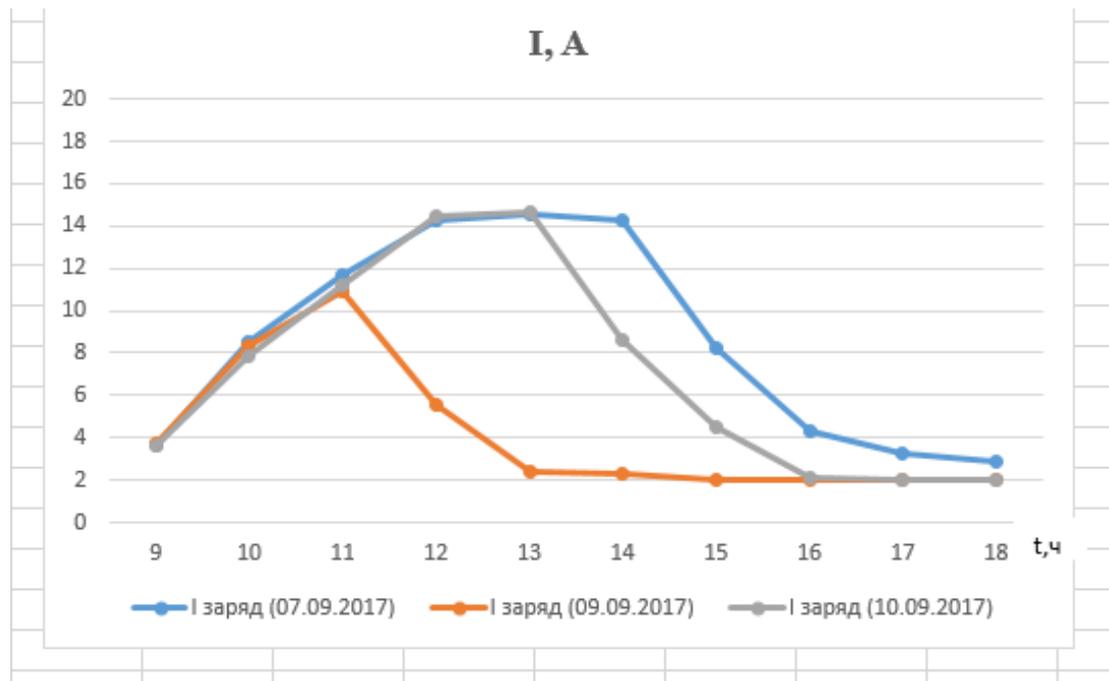


Рисунок 2 – Изменение тока зарядки при подключении нагрузки и без нагрузки



**Рисунок 3** – Изменение тока зарядки без нагрузки при различных условиях потребления энергии

Для определения требуемой мощности фотоэлектрических преобразователей целесообразно использовать данные не о полной установленной мощности потребителей электроэнергии объекта электроснабжения  $P$ , а данные о среднесуточном потреблении электроэнергии  $E$ .

Использование автономной ФСС в децентрализованном электроснабжении в режиме многолетней непрерывной работы предполагает отсутствие периодической подзарядки АБ от внешнего источника. В этом случае фотоэлектрический преобразователь – единственный источник энергии в системе, который при минимуме ее пиковой мощности должен полностью обеспечить электроэнергией автономный объект.

Для определения мощности ФСС необходимо рассчитать общее количество электроэнергии, которое может выработать одна солнечная панель за расчетный промежуток времени. Для расчета потребуется значение солнечной радиации, которое берется в период работы станции, когда солнечная радиация минимальна  $E_{мес}$ . В случае круглогодичной эксплуатации – это декабрь. Часто производится вычисление для сентября.

Определив значение солнечной радиации за интересующий нас период и разделив его на 1000, получим так называемое количество пикчасов, т. е. условное время, в течение которого солнце светит как бы с интенсивностью 1000 Вт/м<sup>2</sup>.

Солнечная панель мощностью  $P_{пан}$  в течении выбранного периода времени выработает следующее количество энергии:

$$E_{пан} = (k \cdot P_{пан} \cdot E) / 1000, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (1)$$

где  $E$  – значение инсоляции за выбранный период, кВт·ч/м<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент, учитывающий поправку на потерю мощности солнечных панелей при нагреве на

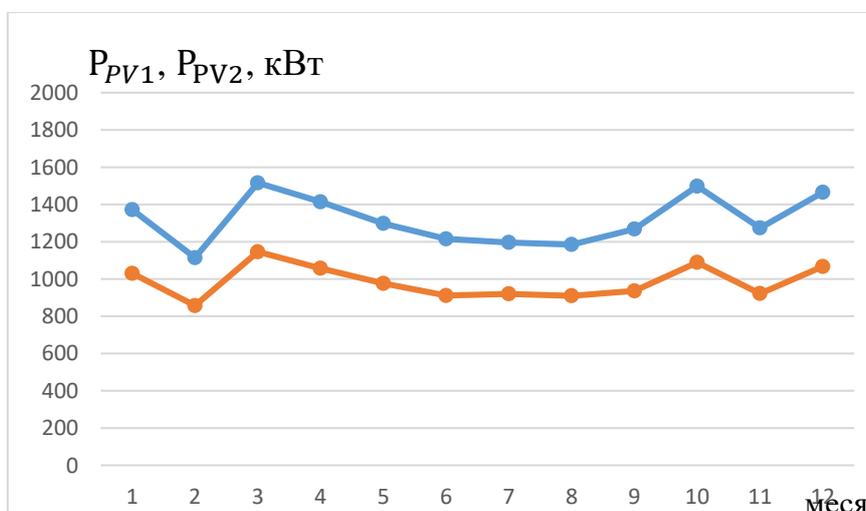
солнце, а также наклонное падение лучей на поверхность фотоэлектрических преобразователей в течении дня. Величина  $k$  принимается равной 0,5 летом и 0,7 в зимний период. Разница в его значении зимой и летом обусловлена меньшим нагревом панелей и меньшей величиной солнечной инсоляции в зимний период.

Полная мощность панелей ФСС определяется из выражения

$$P_{ФСС} = (30 \cdot E / E_{пан}) \cdot P_{пан}, \text{ кВт} \quad (2)$$

где  $E$  – среднесуточное потребление электроэнергии объектом электроснабжения, кВт·ч.

В таблице 2 даны среднемесячные суммы солнечной радиации и суммарные годовые значения солнечной радиации (кВт·ч/м<sup>2</sup>) для этрапов Ахалского велаята Туркменистана, в частности Гокдепинского и Бахерденского этрапов, а также выработка солнечной панели с углом наклона поверхности относительно горизонтальной поверхности  $\beta = 36^\circ$  южной ориентации [9–10]. Кроме этого в таблице 2 приведены выработка панели с мощностью  $P = 415$  Вт, рассчитанная по формуле (1), полная мощность ФСС, рассчитанная по формуле (2), а также количество панелей с мощностью  $P = 415$  Вт в ФСС, месячная выработка ФСС и потребление электроэнергии в течении месяца в селах, где планируются установка ФСС в качестве системы автономного электроснабжения. Полученные данные (таблица 2 и рисунок 4) показывают, что целесообразно выбрать мощности ФСС равными 1200 кВт для села Бори Гокдепинского этрапа и 900 кВт для села Кирпили Бахерденского этрапа.



**Рисунок 4** – Мощности ФСС по месяцам

Сравним выработку электроэнергии ФСС с необходимым для энергоснабжения сельской местности, т. е. для села Кирпили и Бори. Приход

с  
о  
л  
н  
е  
ч  
н  
о  
й

$$E_{удел, \beta} = E \beta \cdot \eta_p \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_m. \quad (3)$$

**Таблица 2 – Выработка ФСС за месяц и месячное потребление электроэнергии**

Месяц	Кол-во дней	Коэф-циент $k$	Село Бори Гокделинского этрапа, кол.домов 238, суточное потребление 3570 кВт·ч, $\beta=36^0$				Село Кирпили Бахерденского этрапа, кол.домов 177, суточное потребление 2655 кВт·ч, $\beta=36^0$							
			$E_{\beta, \text{мес}}$ , кВт·ч/м <sup>2</sup>	Выработ-ка панели (кВт·ч) с мощностью $P_{\text{пан}} = 415 \text{Вт}$	Мощ-ность ФСС, кВт	Кол-во панел ей	Выра-ботка ФСС, кВт·ч	Потребл. электро-энергии, кВт·ч	$E_{\beta, \text{мес}}$ , кВт·ч/м <sup>2</sup>	Выработ-ка панели (кВт·ч) с мощностью $P_{\text{пан}} = 415 \text{Вт}$	Мощ-ность ФСС, кВт	Кол-во панел ей	Выра-ботка ФСС, кВт·ч	Потребл. электро-энергии, кВт·ч
1	31	0,7	115,234	33,475	1372,01	3306	110668	110670	114,143	33,159	1030,08	2482	82300	82305
2	28	0,7	128,187	37,238	1114,01	2684	99946	99960	123,822	35,97	857,69	2066	74314	74340
3	31	0,5	145,957	30,286	1516,48	3654	110665	110670	143,604	29,798	1146,27	2762	82302	82305
4	30	0,5	151,46	31,428	1414,23	3407	107075	107100	150,688	31,268	1057,14	2547	79639	79650
5	31	0,5	170,48	35,375	1298,32	3128	110653	110670	168,587	34,982	976,4	2352	82277	82305
6	30	0,5	176,291	36,58	1215,05	2927	107069	107100	174,81	36,273	911,28	2195	79619	79650
7	31	0,5	185,055	38,399	1196,07	2882	110665	110670	178,731	37,087	920,99	2219	82296	82305
8	31	0,5	186,759	38,752	1185,18	2855	110636	110670	180,699	37,495	910,96	2195	82301	82305
9	30	0,5	168,845	35,035	1268,63	3056	107066	107100	170,123	35,3	936,4	2256	79636	79650
10	31	0,5	147,688	30,645	1498,71	3611	110659	110670	151,099	31,353	1089,42	2625	82301	82305
11	30	0,7	120,066	34,879	1274,31	3070	107078	107100	123,404	35,849	922,06	2221	79620	79650
12	31	0,7	107,91	31,348	1465,1	3530	110658	110670	110,178	32,007	1067,16	2571	82289	82305
<u>ГОД</u>	365		<b>1803,932</b>				1302838	1303050	<b>1789,887</b>				968894	969075

**Таблица 3 – Выработка ФСС за выбранный период и потребление электроэнергии**

Выбранный период	Село Бори Гокдепинского этрапа, кол.домов 238, суточное потребление 3570 кВт•ч, $\beta=36^0$						Село Кирпили Бахерденского этрапа, кол.домов 177, суточное потребление 2655 кВт•ч, $\beta=36^0$					
	Мощность ФСС, кВт	Колич. панелей	Площадь ФСС, м <sup>2</sup>	Выработка ФСС, кВт•ч	Потребл. электро-энергии, кВт•ч	Разница (Излишка), кВт•ч	Мощность ФСС, кВт	Колич. панелей	Площадь ФСС, м <sup>2</sup>	Выработка ФСС, кВт•ч	Потребл. электро-энергии, кВт•ч	Разница (Излишка), кВт•ч
декабрь	1465,1	3530	7624	1964987	1303050	661937	1067,16	2571	5553	1419994	969075	450919
июль	1196,07	2882	6225	1604275	1303050	301225	920,99	2219	4793	1225580	969075	256505
сентябрь	1268,63	3056	6600	1701133	1303050	398083	936,4	2256	4872	1246015	969075	276940
ОПТИМ	1200	2880	6220	1603182	1303050	300112	900	2160	4665	1192993	969075	223918

|

В нашем случае удельная выработка ФСС с учетом наклона  $\beta$  в течении года составляет 257,71 кВт·ч/м<sup>2</sup> год и 255,7 кВт·ч/м<sup>2</sup> год для населенных пунктов Бори и Кирпили соответственно, а ФСС различной мощностью в течении года будет производить электроэнергии показанной в таблице 3. Если считать, что каждый дом в сутки потребляет 15 кВт·ч энергии, то годовое потребление энергии села Бори составит 1303050 кВт·ч. и для села Кирпили составит 969075 кВт·ч. Излишки выработанной электроэнергии приведены в таблице 3.

### **Заключение.**

1. Предлагается проект рационального использования энергии в экспериментальном жилом доме с автономной системой энергоснабжения.

2. Разработан пилотный проект системы автономного энергоснабжения на базе фотоэлектрической солнечной станции с мощностью 2 кВт и ветровой станции с мощностью 2 кВт.

3. Экспериментальные данные показали, что при потреблении энергии свыше 6 кВт·ч в ночное время на каждом из двух, четырех последовательно соединенных аккумуляторов позволяет полностью эффективно использовать ФСС.

4. Разработан пилотный проект ФСС с мощностью 1200 кВт и 900 кВт для обеспечения энергоснабжения населенных пунктов Бори и Кирпили.

5. Разработанный пилотный проект на базе ФСС позволяет повысить надежность и эффективность энергоиспользования системы энергоснабжения для удаленных населенных пунктов.

### **Список цитированных источников**

1. Türkmenistanyň Prezidentiniň Karary bilen tassyklanan “Howanyň üýtgemegi barada Türkmenistanyň Milli strategiýasy (rejelen görnüşi). Aşgabat, 2019ý. Türkmenistanyň Prezidentiniň 2019-njy ýulyň 23-nji sentýabrynda çykaran 1415-nji Karary bilen tassyklanyldy.

2. Türkmenistanyň Prezidentiniň Karary bilen tassyklanan «Türkmenistanda 2030-njy ýyla çenli gaýtadan dikeldilýän energetikany ösdürmek boýunça Milli Strategiýa. Aşgabat, 2020ý. Türkmenistanyň Prezidentiniň 2020-nji ýulyň 04-nji dekabrynda çykaran 2007-nji Karary bilen tassyklanyldy.

3. Gaýtadan dikeldilýän energiýa çeşmeleri hakynda Türkmenistanyň Kanuny. Aşgabat şäheri. 2021-nji ýulyň 13-nji marty.

4. Охоткин, Г. П. Методика расчета мощности солнечных станций. / Г. П. Охоткин // Вестник Чувашского университета. – № 3, 2013. – С.222–230.

5. Сурков, М. А. Оценка целесообразности применения фотоэлектрических установок для электроснабжения удаленных потребителей в климатических условиях Севера Российской Федерации [Электронный ресурс]. / М. А. Сурков [и др.] // Интернет-журнал «Науковедение» Том 8, № 4 (2016). Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/97TVN416.pdf>.

6. Nazarow, S. Türkmenistanyň welaýatlarynda Günüň energiýasyny ulanmak mümkinçiligi / S. Nazarow, A. Jumaýew // Türkmenistanda ylym we tehnika, 2019. № 6. С. 34–39.
7. Мхитарян, Н. М. Комплексное использование энергии возобновляемых источников / Н. М. Мхитарян [и др.] // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. № 17 (139), 2013. P. 14–22.
8. Джумаев, А. Я. Возможности использования солнечной энергии в регионах Туркменистана / /Вестник Гомельского Государственного технического университета имени П. О. Сухого. Научно-технический журнал. № 3/4 (82, 83), 2020. С. 74–80.
9. Jumayev, A. Distribution of solar energy potential on territory of Turkmenistan. / A. Jumayev, //IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sciences 1010 (2022). 012157 doi:10.1088/1755-1315/1010/1/012157.
10. Jumayev A., Atayev E. Pilot projects of industrial photovoltaic solar stations / A. Jumayev, E. Atayev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sciences 979 (2022). 012142 doi:10.1088/1755-1315/979/1/012142.

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ НА ТЕПЛОПТЕРИ ЗДАНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ

*Ю. В. Каперейко*

Стажер младшего научного сотрудника, БрГТУ, Брест, Беларусь,  
yulya.kapereyko@mail.ru

### **Аннотация**

В данной статье представлены результаты по исследованию влияния различных факторов на теплопотери здания и возможностей их учета при проектировании и эксплуатации систем отопления. К таким факторам относится воздействие ветра, осадков, солнечной радиации и т.д. Также предложена концепция метеопрогностического регулирования для достижения более экономичного энергопотребления.

**Ключевые слова:** система водяного отопления, метеопрогностическое регулирование, микроклимат помещений.

## THE INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS OF INFLUENCE ON THE HEAT LOSS OF BUILDINGS IN THE DESIGN AND USING OF WATER HEATING SYSTEMS

*Y. Kapereyko*

### **Abstract**

This article presents the results of a study of the influence of various factors on the heat loss of a building and the possibilities of taking them into account when designing and operating heating systems. Such factors include the effects of wind, precipitation, solar radiation, etc. The article proposes the concept of weather forecasting control to achieve more economical energy consumption.

**Keywords:** water heating system, weather forecasting control, indoor microclimate.

**Введение.** В последние десятилетия развития способов проектирования различных инженерных систем ярко выражается необходимость рационализации процессов управления этими системами для установления экономически и энергетически обоснованных режимов работы.

В современных решениях погодозависимого управления параметрами систем водяного отопления реализован принцип использования фактической информации, получаемой напрямую со стороны датчиков наружной температуры. Однако существуют и другие факторы, которые влияют на теплопотребление зданием энергии, причем эти факторы не учитываются ввиду их малой значимости и непостоянства воздействия. Это подтверждается при рассмотрении методик

расчета теплотеря зданием. Однако, для достижения экономичности использования энергоресурсов следует учитывать и другие факторы влияния. Целью исследования является изучение возможностей учета различных факторов влияния для энергоэффективного потребления, а также целесообразности применения полученных результатов.

**Материалы и методы.** Методологическая основа исследования в рамках этапа состояла из сбора данных, комплексного анализа и системного подхода в рамках метеопрогностической детерминации предиктивного управления системой отопления. Исследование проводилось посредством расчетов и моделирования на примере модели здания.

**Результаты и обсуждение.** В пределах отопительного сезона колебания температуры наружного воздуха играют весомую роль в области эффективного теплотребления. Однако стоит учесть, что помимо температуры наружного воздуха, существует другое множество факторов, которые влияют на микроклимат помещений. К внешним факторам относятся: скорость и направление ветра; увлажнение поверхностей, ограждающих конструкции из-за осадков разного агрегатного состояния; облачность и интенсивность прямой и рассеянной радиации; барометрическое давление; влажность воздуха. К внутренним факторам можно отнести условия протекания технологического процесса внутри здания: теплоступления от людей, от солнечной радиации, от бытовых приборов, от электроосвещения, теплотери при эксфильтрации внутреннего воздуха, при осуществлении вентилирования помещения.

Многие из этих факторов являются непостоянными, появление того или иного значения параметров обусловлено большим числом факторов и носит случайный характер. Поэтому для обобщения метеорологических и иных элементов или параметров используются положения теории вероятностей и методы математической статистики. Однако некоторые из вышеперечисленных факторов можно использовать в расчётах для отражения более приближенной к реальности картины теплообменных процессов ограждающих конструкций. С помощью детальных вычислений можно сформулировать зависимости для поддержания комфортных параметров микроклимата в помещениях зданий, учитывая все факторы воздействия на тепловые потери, тем самым обеспечить наиболее точную оценку эффективности применяемых методов регулирования систем водяного отопления.

Изменение температуры является основным фактором при регуляции по нему параметров системы отопления. Применение погодозависимой автоматики приблизило параметры микроклимата помещений к наиболее комфортным, системы отопления стали более инерционными. Однако этот метод регулирования характеризуется таким понятием как гистерезис элементов системы отопления, т. е. временем, за которое система достигнет требуемого состояния по заданным кри-

териям. Запаздывание системы может составлять трудности в создании комфортного микроклимата в помещениях зданий при динамично изменяющихся наружных параметрах климата.

Воздействие ветра обуславливается активным движением воздушных масс на поверхности ограждающих конструкций, что усиливает конвекцию и перенос тепла. Этот процесс описывается изменением коэффициента теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, который можно вычислить с помощью уже известных формул [1].

Влияние влажности на режим эксплуатации зданий является сложно оценимым фактором. Диффузия водяного пара наиболее существенна в холодное время года, т. е. в отопительный период, а влажностный режим ограждений оказывает существенное влияние на теплозащитные характеристики. Установить общую математическую зависимость между теплопроводностью материала и его влажностью, одинаковую для всех строительных материалов, не представляется возможным, так как значительное влияние оказывают структура, форма и расположение пор материала, химико-минералогический состав, поэтому в расчетах используют данные лабораторных испытаний для двух условий эксплуатации (так называемые А и Б). В настоящее время отсутствует нормативный документ по методу определения зависимости коэффициента теплопроводности от влажности конструкций. Исследования сводятся к выявлению эмпирических зависимостей теплопроводности материалов от их влажности [2]. Однако применение этих данных затруднено ввиду громоздкости вычислений.

Наружные ограждения по-разному передают тепловые потоки от коротковолновой солнечной радиации. В массивных ограждениях происходит поглощение тепла солнечной радиации поверхностью. Нагретая поверхность возвращает частично тепло в наружную среду, а частично передает через толщу ограждения внутрь помещения. Поступление солнечной радиации через заполнения световых проемов определяется по методике, изложенной в [3]. Часть теплоты, которая аккумулируется ограждающими конструкциями, также является важным слагаемым при вычислении общих тепловых потерь здания и может быть определена с помощью известных формул [3, раздел 2.1.3], а также с помощью других материалов [1, разделы 5.2–5.3].

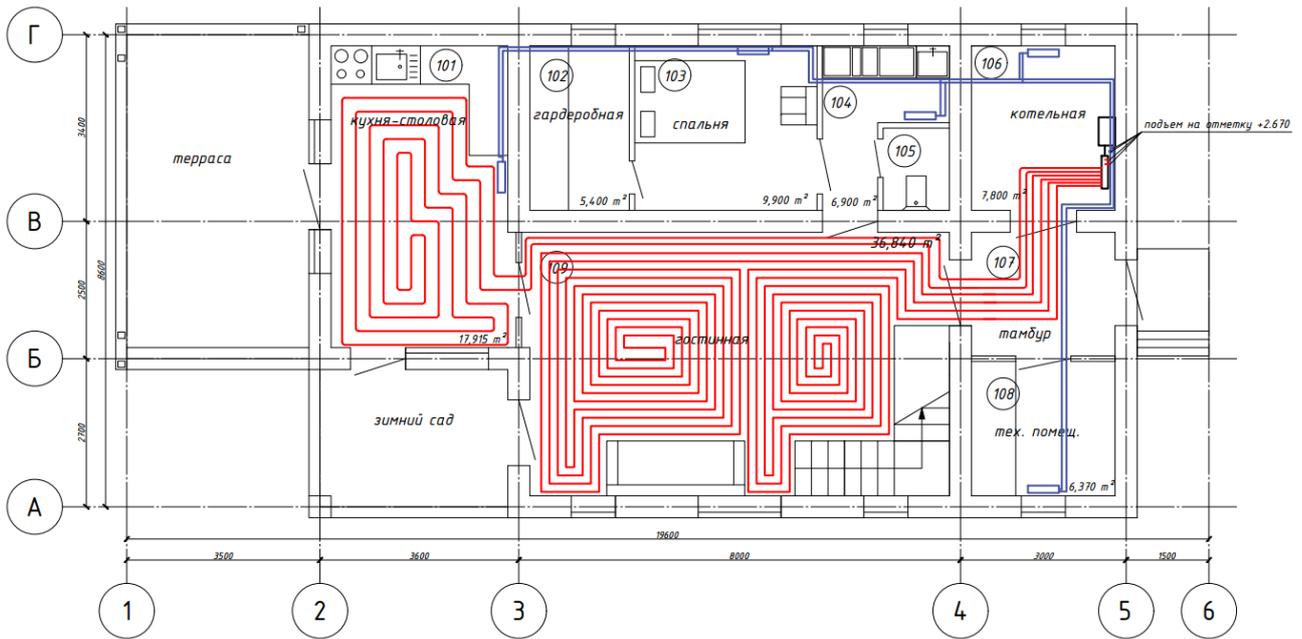
Таким образом, факторы влияния на микроклимат помещения можно учесть, но некоторые из них будут являться лишь приближенной к реальности величиной.

Согласно СН 4.02.03-2019 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» [4] тепловые потери через ограждающие конструкции рассчитываются с использованием сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, расчетной температуры воздуха в помещении и расчетной температуры наружного воздуха. Условия теплообмена на наружной поверхности ограждений здания не являются определяющими во многих случаях и прежде всего при расчете тепловых потоков, проходящих через ограждения. С помощью дополнительных вводных коэффициентов (добавочные потери теплоты через ограждающие конструкции в долях от основных потерь) значение теплотерь корректируется и является укрупненным показателем.

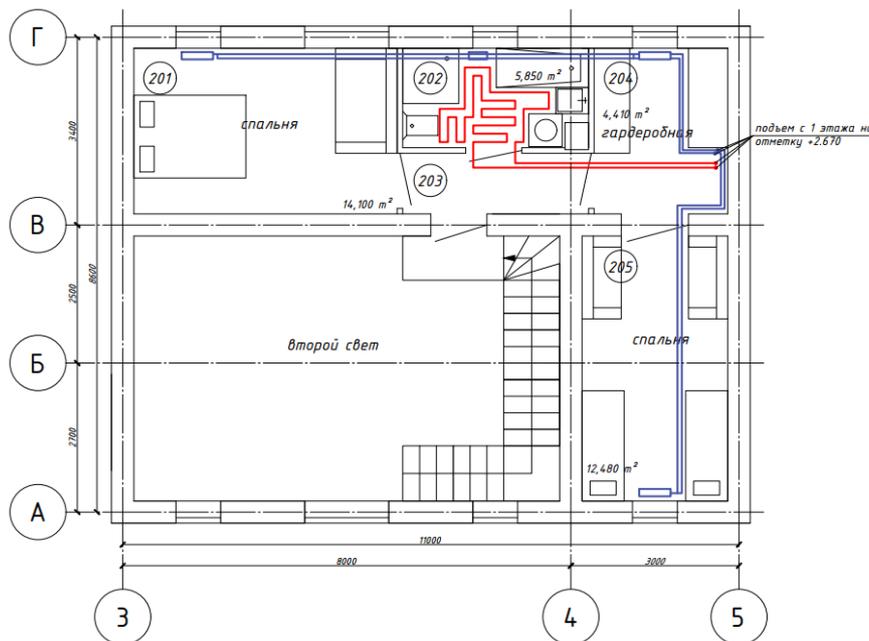
Однако при эксплуатации системы отопления тепловые потери могут составлять большие или меньшие значения, чем вычисленные по установленной методике расчета. Все это влияет на потребление зданиями тепловой энергии и может привести к её перерасходу. Эксплуатационные условия должны по возможности отражать близкое к реальному изменение параметров наружного климата во времени года. Именно год является основным временным элементом, в рамках которого проявляются систематические режимы функционирования здания. В данной работе в качестве временного параметра будет использоваться отопительный период.

В целях энергосбережения предложена концепция метеопрогностического регулирования. Она заключается в использовании информации о погодных условиях не через внешние температурные датчики (так называемая погодозависимая автоматика), а при помощи прогнозных метеоданных, получаемых непосредственно для конкретной географической точки расположения здания через определенный промежуток времени.

Расчеты по влиянию ветровой нагрузки на тепловые потери помещения включают в себя: учет наветренной, подветренной и боковой сторон здания по отношению к текущему направлению ветра; изменение скорости ветра на разных высотах по отношению к зданию (1 и 2 этаж); совместное действие ветровой нагрузки и изменяющейся температуры на тепловые характеристики ограждающих конструкций. Для расчета была принята модель индивидуального двухэтажного жилого дома (рисунок 1, рисунок 2). Массив данных (фрагмент представлен на рисунке 3) по расчету данных характеристик составил основание для построения графика зависимости влияния ветра на теплопотери здания в сравнении со стандартным расчетом без учета данного фактора влияния (рисунок 4). За основу были взяты метеорологические данные за отопительный период 15.10.2021–15.04.2022 [5]. Сбор метеоданных осуществлялся в рамках следующих географических координат (г. Брест, Республика Беларусь): 52.083354, 23.772257. Таким образом, обеспечивается календарная полнота охвата отопительного периода.



**Рисунок 1** – План первого этажа индивидуального жилого дома с нанесением элементов запроектированной системы водяного отопления



**Рисунок 2** – План второго этажа индивидуального жилого дома с нанесением элементов запроектированной системы водяного отопления



В соответствии с метеопрогностической концепцией необходимо заблаговременно определить предполагаемые теплотери помещения и предварительно установить необходимые температуру и расход через отопительный прибор. Для этого необходимо знать, через какое время  $\Delta t$  отопительный прибор перейдет с теплоотдачи  $Q_1$  на теплоотдачу  $Q_2$ .

Для моделирования ситуации симитируем конкретные условия задачи. Например, на начальный этап времени теплотери помещения 205 составляют  $Q_1 = 101,4$  Вт. Спустя 3 часа тепловые потери помещения будут составлять  $Q_2 = 108,2$  Вт. Какое время требуется отопительному прибору для изменения теплового потока с  $Q_1$  на  $Q_2$ ? Какие температуры в подающем и обратном трубопроводе должны быть, если расход остается неизменным  $G = 34,17$  кг/ч. Поддерживаемая температура в помещении  $20$  °С. Какой расход необходимо установить на отопительный прибор если температуры в подающем и обратном трубопроводе останутся неизменными (80/60)?

Размеры установленного отопительного прибора: 7 секций, каждая мощностью  $Q_{np} = 180,23$  Вт при температурном напоре  $70$  °С. Вес одной секции  $1,49$  кг. Объем воды  $0,37$  л.

Для вычисления изменившегося расхода необходимо использовать формулу

$$G = 0,86 \cdot Q_{np} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 / (t_1 - t_2), \quad (1)$$

где  $Q_{np}$  – тепловая нагрузка прибора, Вт;

$G$  – расход теплоносителя, кг/ч;

$\beta_1$  и  $\beta_2$  – коэффициент учета дополнительного теплового потока устанавливаемых отопительных приборов за счет округления сверх расчетной величины и коэффициент учета дополнительных потерь теплоты приборами у наружных ограждений соответственно;

$t_1$  и  $t_2$  – температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе соответственно.

Таким образом получим:

$$G_1 = 0,86 \cdot 101,4 \cdot 1,04 \cdot 1,02 / (80 - 60) = 4,63 \text{ кг/ч},$$

$$G_2 = 0,86 \cdot 108,2 \cdot 1,04 \cdot 1,02 / (80 - 60) = 4,94 \text{ кг/ч}.$$

Для вычисления изменившейся температуры при постоянном расходе необходимо задаться минимальной температурой в обратном трубопроводе. Примем ее равной  $t_2 = 35$  °С. Тогда температуру теплоносителя в подающем трубопроводе  $t_1$  вычислим по формуле

$$t_1 = (0,86 Q_{np} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2) / G + t_2 \quad . \quad (2)$$

Пусть  $t_1'$  и  $t_1''$  – температуры теплоносителя подающего трубопровода при постоянном расходе с требуемой тепловой нагрузкой на отопительный прибор  $101,4$  Вт и  $108,2$  Вт соответственно.

$$t_1' = (0,86 \cdot 101,4 \cdot 1,04 \cdot 1,02) / 34,17 + 35 = 37,707 \text{ °С}$$

$$t_1'' = (0,86 \cdot 108,2 \cdot 1,04 \cdot 1,02) / 34,17 + 35 = 37,889 \text{ °С}.$$

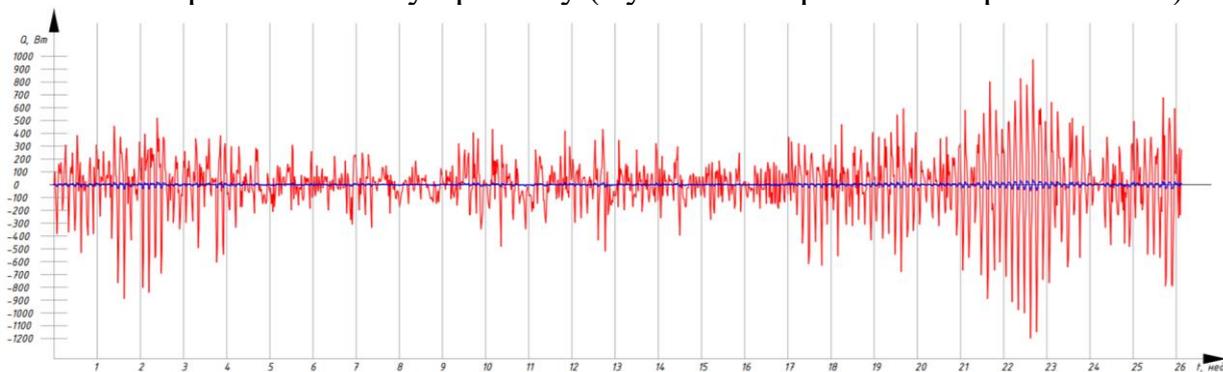
Как видим, разница слишком мала, поэтому данный способ регулирования может подойти только вместе с корреляцией расхода и температуры, а не только температуры.

Таким образом, при изменяющемся расходе можно достичь комфортного регулирования параметрами системы водяного отопления. Однако ввиду наличия инерционности здания и системы отопления в целом можно принять, что время, которое необходимо системе для плавного регулирования, равняется трем часам, что приблизительно соответствует реальным значениям, известным из практики эксплуатации систем водяного отопления.

Тогда будем считать, что время запаздывания системы отопления со стандартной погодозависимой автоматикой составляет три часа (значение принято на основании известных из практики реальных значений при эксплуатации систем водяного отопления), а в концепции метеопрогностического регулирования это время сглажено и при идеальных условиях полностью компенсирует тепловые потери в текущий момент времени. Таким образом, можно построить график зависимости теплотерь от времени на основании предыдущих расчетов для той и другой ситуации.

Также стоит задаться среднестатистической погрешностью метеорологического прогноза для конкретной точки приложения в размере 4 %.

График зависимости влияния ветровой нагрузки на тепловые потери здания за отопительный период представлен на рисунке 4, график отклонения тепловых потерь с учетом запаздывания системы отопления в сравнении с теоретическим регулированием параметрами теплоносителя по метеопрогностической концепции представлены на рисунке 5. Красной линией представлен график отклонения тепловых потерь от требуемых при регулировании погодозависимой автоматикой, синей линией – график отклонения тепловых потерь от требуемых при регулировании по метеорологическому прогнозу (с учетом погрешности прогноза 4 %).



**Рисунок 5** – График отклонения тепловых потерь с учетом запаздывания системы отопления в сравнении с теоретическим регулированием параметрами теплоносителя по метеопрогностической концепции

Как видим, отклонение от требуемой компенсации тепловых потерь при применении погодозависимой автоматики значительно выше, чем при использовании метеопрогностического подхода.

Для наиболее экономически и энергетически обоснованных режимов работы систем отопления необходимо создавать такие методы управления этими системами, которые бы учитывали воздействие ветра на тепловые потери зданий через ограждающие конструкции.

## **Заключение.**

1. Учет влияния ветрового воздействия содействует более точному поддержанию комфортной температуры в помещениях зданий, а также является важным параметром при оценке эффективности применяемых методов регулирования систем водяного отопления. Системы водяного отопления постоянно модифицируются и совершенствуются, внедряется различное оборудование и арматура для более эффективных и удобных методов управления этими системами.

2. Удалось получить рабочее решение по нивелированию тепловой инерционности отопительной системы, тем самым увеличивая общую экономию топливных энергоресурсов без потери комфортных условий.

3. Также для конкретных условий применения данного подхода регулирования возможна разработка интеллектуальных программ, которые будут выполнять функцию контроля и управления, сравнения рассчитанных и действительных тепловых характеристик различных элементов системы отопления, внесения корректировки в текущие графики тепловой нагрузки и способы воздействия на тепловые параметры системы.

### Список цитированных источников

1. Кувшинов, Ю. Я. Энергосбережение в системе обеспечения микроклимата зданий / Ю. Я. Кувшинов. – М.: Издательство АСВ, 2010. – 320 с.
2. Куприянов, В. М. Влияние влаги на теплопроводность стеновых материалов. Состояние вопроса / В. Н. Куприянов, А. М. Юзмухаметов, И. Ш. Сафин // Известия КГАСУ. – 2017. – № 1. – С. 102–110
3. Хрусталёв, Б. М. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование: учебное пособие / Б. М. Хрусталёв. – М. : Издательство АСВ, 2008. – 784 с.
4. СН 4.02.03-2019 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – М. : Стройтехнорм, 2019. – 73 с.
5. Архив погоды в городе Бресте [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru>. Дата доступа: 16.04.2022.
6. Хрусталеv, Б. М. Тепло- и массообмен : учеб. пособие для вузов по строительным, энергетическим и машиностроительным специальностям : в 2 ч. / Б. М. Хрусталеv [и др.] ; под общ. ред. А. П. Несенчука. — Минск : БНТУ, 2007. – Ч. 1. – 607 с.
7. Сканави, А. Н. Отопление: учебник для вузов / А. Н. Сканави, Л. М. Махов. – М. : Издательство АСВ, 2008. – 576 с.
8. Покотилоv, В. В. Системы водяного отопления. / В. В. Покотилоv. – Вена : 2008. – 159 с.
9. Семенов, Л. А. Теплоустойчивость и печное отопление жилых и общественных зданий. / Л. А. Семенов. – М. : Издательство Министерства строительства предприятий машиностроения, 1950 г. – 262 с.
10. Мешик, К. О. Увеличение энергетической эффективности работы СВО посредством применения метеоданных / К. О. Мешик ; науч. рук. Л. Н. Данилевский // Современные проблемы природопользования и природообустройства : сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции молодых ученых, посвящённой 50-летию кафедры природообустройства, Брест, 6–7 октября 2022 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет, Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, Брестский областной комитет природных ресурсов и охраны окружающей среды ; редкол.: А. А. Волчек [и др.] ; науч. ред.: А. А. Волчек, О. П. Мешик. – Брест : БрГТУ, 2022. – С. 80.

## СОВОКУПНОСТЬ ПРОЕКТОВ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ МЕЖДУНАРОДНОЙ МАРИИНСКОЙ АКАДЕМИИ В ДУБАЕ

*О. Ю. Латышев<sup>1</sup>, П. А. Латышева<sup>2</sup>, М. Радаэлли<sup>3</sup>, М. Луизетто<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Президент Международной Мариинской академии  
имени М. Д. Шаповаленко, г. Москва, Россия, para888@list.ru

<sup>2</sup> Исполнительный директор Международной Мариинской академии имени  
М. Д. Шаповаленко, г. Москва, Россия, para888@list.ru

<sup>3</sup> Вице-президент Международной Мариинской академии  
имени М. Д. Шаповаленко, г. Милан, Италия, radamass1@gmail.com

<sup>4</sup> Почётный вице-президент Международной Мариинской академии  
имени М. Д. Шаповаленко, г. Пьяченца, Италия, maurolu65@gmail.com

### Аннотация

Мариинская Академия имени М. Д. Шаповаленко разрабатывает серию проектов, которые существенно дополняют перечень традиционных альтернативных источников энергии, используемых в настоящий момент в быстро развивающемся Дубае.

**Ключевые слова:** Дубай, альтернативный источник энергии, электроэнергия, вибрация, зелёная энергетика, Объединённые Арабские Эмираты, энергосбережение.

## SET OF ENERGY SAVING PROJECTS AT THE INTERNATIONAL MARIINSKAYA ACADEMY IN DUBAI

*O. Yu. Latyshev<sup>1</sup>, P. A. Latysheva<sup>2</sup>, M. Radaelli<sup>3</sup>, M. Luisetto<sup>4</sup>*

### Abstract

Mariinskaya Academy named after M. D. Shapovalenko is developing a series of projects that will significantly complement the list of traditional alternative energy sources currently used in the rapidly developing Dubai.

**Keywords:** Dubai, alternative energy source, electricity, vibration, green energy, United Arab Emirates, energy saving.

**Introduction.** The object of this study is system of alternative energy sources in Dubai. The relevance of the study lies in the need to completely abandon the use of hydrocarbon energy sources, the supply of which is coming to an end. At the same time, this should improve the environmental situation in the emirate of Dubai through the introduction of a system of alternative energy sources. In modern world literature, unfortunately, the results of research aimed at introducing a system of alternative energy sources into the energy system of megacities built in the hottest, arid climate have not yet been reflected. In the literature sources reviewed in this study, the lack of a solution to this problem is noted. Nevertheless, as predecessors on whose research this work is based, we consider it our duty to name such scientists as S. V. Alekseenko, A.

Alkhasov, V. V., N. J. H. Almukhtar, V. N. Ilyin, S. Kudiyarov, G. R. Mashori, L. N. Makarova, V. A. Podkopaeva, Yu. S. Osipov, V. Sidorovich, V. Ya. Ushakov and many others. The purpose of this study is to present a holistic system of alternative energy sources in Dubai. The list of tasks planned for solution includes demonstrating the combined capabilities of solar energy, wind, water, pressure, vibration and many other alternative energy sources. Their integrated use is intended to play a decisive role in the formation of a comprehensive system for overcoming dependence on hydrocarbon energy sources and creating the prerequisites for improving the environmental situation in the UAE emirate in question.

**Materials and methods.** This work uses such productive and non-productive research methods as analysis of scientific literature, observation, experiment and others.

**Results and discussion.** The Mariinskaya Academy is developing a series of projects to significantly supplement the list of traditional alternative energy sources.

Project "Solar City". Strategically, every square centimeter of the area of each building in the exterior and interior, as well as the roofs of the autobahns and any other structures should generate electricity from solar panels transformed into cladding, decor and all hard surfaces. The free provision of land plots and full tax exemption quickly enough leads to the opening of the maximum necessary in this case, the number of companies that specialize in the production and installation of solar panels, the accompanying inventories, batteries and their other components. Thanks to this, solar panels have different sizes and different configurations, which makes it possible to efficiently use each square decimeter of a building in order to generate solar energy for its lighting, cooling, as well as for operating a variety of electrical appliances. At the same time, solar panels should be placed on internal and external walls, floors of internal premises and sidewalks in the area adjacent to the building, as well as, as it is legally enshrined and implemented by 2030 in Dubai, on roofs. Windows, in which electric glasses will be placed instead of ordinary glasses, should also function as solar panels. At the moment, the efficiency of electric glass is still significantly inferior to wall-mounted solar panels. But the key principle in this case is that the building's space is fully utilized for energy production, and all components of its design, regardless of efficiency, are included in the international energy chain. At the same time, electric glasses can completely replace the outer skin of a building, due to which the required amount of light gets into it, although some of it will be taken away by electric glasses. Their rather low efficiency is compensated by the fact that they take on part of the energy flow of sunlight. This will be all the more efficient as the electric glasses will be tilted to further reduce the level of natural overheating of the building. This reduces the natural heating of the building structure during particularly hot months of the year. At the same time, electricity for the operation of air conditioners and fans will be consumed to a much lesser extent. Although the efficiency of using electric glass currently does not exceed 7%, this does not prevent the entire building from being a solar power plant at the same time. It is necessary to find optimal ways to increase the efficiency of electric glass. This will allow not only the building itself, but also the electric cars of

its residents to be charged in the parking lot near the house while the owners are not leaving.

Project "Mighty Wind". Wind turbines should be included in all structural elements of buildings and other structures, the presence of which will allow maintaining the proper level of safety for residents, workers and the comfort of their stay in the building.

Project "Green noise". Special membranes will collect the energy of the noise emitted by the human voice and the voices of animals and birds, as well as artificial sources of noise, and will allow the use of this energy flow for human needs. Another important component of energy supply, which is designed to serve as compact wind turbines installed on balconies, terraces, roofs and any other suitable surfaces for this. To do this, an elegant architectural solution has to be found, as a result of the implementation of which the wind turbines will not only not spoil the original architectural concept, but will also add a spicy and interesting addition to it. For example, the shape and design of a building can imitate a certain aircraft, and wind turbines, respectively, can simulate propellers on its surface. Since the abundance of wind turbines on the surface of the building will cause significant noise, as the project is introduced into the capital's urban environment, it will be necessary to find quite effective means of noise reduction.

Vibrolight project. Noise is often either accompanied by vibration or is its consequence. It can also be used to receive vibrational energy and convert it into electrical energy. It seems possible to add energy to solar panels, wind generators and recuperators thanks to the generator of electricity from vibration. Membranes of such devices, as well as noise absorption membranes, can be included in the decoration of walls and ceilings of educational institutions (especially school recreation), stadiums, and concert halls. In this concept, wind has already been presented as a source of energy twice. The third time it is mentioned in connection with the significant vibration that it produces, which means that it can also serve as a source of vibrational energy [8]. Using piezoelectric materials, the energy harvesting materials will produce energy from any kind of vibration that influences the surface of such materials. Such an energy source will become more and more noteworthy as more and more devices are developed that require the lowest power consumption. In this case, we are not talking about the transfer of energy over any significant distance, but at the same time it can be fully used at the same place where it was received. In the same way that cars moving on the road can "recharge" economical LED traffic lights.

Green Light Project. Sunlight and the light of lamps in the room is intended to become a secondary resource, which at the moment, for the most part, is not used in any way. But built into all surfaces of the home interior, solar panels of various colors and configurations allow the same light to be used repeatedly. Sunlight entering the building, as well as the light of the electric lamps working inside it, is captured by the now opaque solar panels placed on the inner walls, doors, floors and ceilings of each room in the building. At the same time, it should be noted that the usual appearance of solar panels placed in the interior of a residential building could hardly arouse the enthusiasm of its residents [9]. Therefore, in the process of implementing this project, it will be necessary to achieve a highly aesthetic performance of solar panels, due to the

proper design solution, capable of pleasing the eye with their appearance to all those who are in this room. In the future, it will be necessary to find a type of solar panels that will meet environmental requirements for residential and non-residential premises. In this case, the solar panels should be left, especially located on the floor. , so their service life increases the profitability of this material. Also, according to the author's intention, furniture and household appliances in the building are also sheathed with solar panels [7]. Household electrical appliances are designed to at least to some extent provide their own need for electricity, and objects in the room environment will have to transfer the energy they have accumulated to storage batteries.

Project "House asset" or "House plus energy". Ideally, "Home Plus Energy" should use the entire range of renewable energy sources - both directly and indirectly. Perhaps, for example, not every home can have a biofuel station installed. But in this case, all the missing fuels must come from centralized stations. The new regulation on energy saving and energy efficiency of operated buildings will allow commissioning at least only houses with zero energy consumption - 0 kW / m<sup>2</sup> per year. And ideally - "active houses", or "home plus energy", which will be designed to generate electricity not only for their own, but also for other needs. An organic addition to the zero-energy home, as well as to the active home, will be the road leading to it, the energy resources of which were announced in the Mohammed bin Rashid Al Maktoum highway project [10].

The Road to Home project. Unlike many high-profile projects, it is much better not to put solar panels under the wheels of cars, where they will quickly become unusable, but to make autobahn roofs with an adjustable angle, for which the solar panels placed on them must be of a much lighter design. On the road, only a rail should be left for recharging cars and electric vehicles while driving. The Road to Home project involves a rethinking of the world's best practices in building roads capable of generating electricity. Thus, it seems to scientists that the revolutionary projects of Solar Roadways, Qilu Transportation Development Group and others should be significantly improved [6]. This should be done in such a way that between the layer of transparent concrete proposed in such projects and the insulating underlying layer, solar panels are installed at an optimal angle of inclination. For each geographic zone, this angle must be specific, and be in direct proportion to the latitude of the area for which the roadbed is made. In section, this structural layer will be a series of equilateral triangles, the value of equal angles in which will also be determined by the expediency of the angle of inclination of the solar battery for a given geographical latitude. It is also desirable to develop an appropriate device that allows you to create a change in the angle of inclination of the solar panel depending on the season. For example, from 30-40 degrees in summer to 70 and more in winter. Regarding the project developed for the Chinese city of Jinan by Qilu Transportation Development Group, the authors of this strategy consider it their duty to provide the following impressive data: "a kilometer section with two lanes can generate up to 1 million kWh of electricity per year. This amount is enough to power 800 residential buildings. The electricity generated is used for street lighting, billboard lighting, security cameras and toll vending machines. In addition,

energy is spent on heating the track so that snow does not accumulate on it. The company gives the excess output to local power grids [5].

The Sandstorm Energy project. The Sandstorm Energy project has something in common and can, if necessary, form a single whole with the Mighty Wind and VibroLight projects. Heat from hot sand and friction from the surface of buildings can heat water for steam turbines, and noise and vibration energy can be converted into electricity [1]. The Sandstorm Energy project has something in common and can, if necessary, form a single whole with the Mighty Wind and Vibrolight projects. The places for the construction of residential, office and industrial buildings will be used in a variety of ways, since technologies will make it possible to withstand sandstorms, and an increase in the water level in the world's oceans, and the level of maximum air temperature. Moreover, none of these factors will have to be resisted. Each of them will be rationally used by all architectural structures to convert the entire set of natural impacts into electrical energy. It will convert both the wind pressure on the walls of buildings, and hot air through the transformation of thermal energy into electric current, and vibration of the air into outdoor and indoor lighting [2].

Project "Biolight". The combination of primary and secondary energy flows becomes possible due to the introduction of a cycle of the most complete processing of raw materials, as well as the direction of the steam leaving the plant to steam turbines. Biogeneration stations can be significantly improved during this period, so that the result of biofuel processing in them can be added to additional processing until such a stage when none of them can have a negative impact on the environment. Very fine filtration is required so that only water vapor is generated at the outlet. And it can also provide electricity by building a combined power plant that combines its biological nature with the nature of a steam power plant.

Project "Cleansing Stream". If the wastewater reaches the turbines directly at the treatment plant, the accompanying methane can be burned to generate electricity. The use of turbines in wastewater treatment plants should be complemented by the production of methane for refueling vehicles and gas cylinders used for cooking on camping trips [3].

Project "Emotions of entertainment». The need to search for renewable sources of energy can and should be consequently somewhat reduced by adjusting educational programs around the world, thanks to which a person will more clearly understand his real needs instead of immersing his numerous funds, time and effort into "an endless wardrobe and just as much" endless refrigerator. Resources, with the realization that real needs are much less than imagined, will require much less.

Thus, the development of renewable energy projects in Dubai can gain significant momentum if the above and other similar projects are consistently implemented, which can be discussed in the following works. The vast majority of Dubai's huge shopping malls are to be transformed into shopping and entertainment centers, where the line between shopping and paying for services will gradually disappear, just as the distinctive border between the emotions of shopping and the emotions of entertainment will dissolve [4]. The more entertainment there is, the less shopping will be required, which is also more entertainment for well-to-do people than smart purchases. The load on

factories, which are forced to produce more and more new things, will decrease. And this will, in turn, reduce the burden on the environment. Especially - taking into account how many diverse resources are required to produce a kilogram of cotton, nylon or any innovative material.

**Conclusion.** The totality of the projects proposed in this work constitutes an integral system of alternative energy sources that will help the emirate of Dubai in the UAE to completely free itself from the need to use petroleum products. This will be carried out with the aim of providing an alternative energy supply to the city infrastructure and meeting the needs of each of its residents or guests. It is proposed to draw the following conclusions:

1. Depending on the rate of increase in the efficiency of electric glass, the interest of architects and development teams in Dubai in using them not only in window openings will increase. They are also expected to be used in cladding the facades of buildings designed to transmit sunlight filtered from excess infrared and ultraviolet radiation into the premises.

2. A fundamental increase in the level of strength of the materials from which solar panels are traditionally made will make it possible to use them not only for the manufacture of highway roofs. At the same time, they are also expected to be used for inclusion in road surfaces, as well as in the coating of playgrounds, parking lots, sidewalks and other ground surfaces that are subject to increased pressure.

3. The more the area of the buildings of cinema halls, concert halls, circuses and sports arenas increases, the greater the effect will be brought by the project of using noise vibration for their energy supply, which appears in abundance during the use of each such building.

4. The process of development of technologies, which at the moment are not yet in any way connected with the creation of a system of alternative energy sources, can push for the development of these sources themselves, fundamentally expanding their list and significantly updating the models presented in this work.

**Acknowledgments.** The team of authors expresses gratitude to the staff of the Marinsk Academy for the information and other support provided during the writing of the article.

#### **Список цитированных источников**

1. Алхасов, А. Возобновляемая энергетика / А. Алхасов. ISBN 978-5-9221-1244-4 – 2010. – 257 с.
2. Возобновляемая энергетика. сб. науч. Трудов / МГУ им. М. В. Ломоносова. Географический факультет; отв. редактор В. В. Алексеев. – М. : Изд-во Московского университета, 1999 г. – 188 с.
3. Кудияров, С. «Газмагеддон» наоборот / С. Кудияров // Эксперт. – 2021. – № 45 (1228).

4. Жилиева, В. А. Физкультурное образование в системе повседневной и профессиональной жизни и деятельности в Дубае / В. А. Жилиева [и др.] // Образование и личность: методологические и прикладные основания: сборник статей к Международной научно-практической конференции «Ценностный потенциал физической культуры и безопасности жизнедеятельности: методология, инновации в науке и образовании» (20–21 октября 2021г.). – Оренбург: Типография «Экспресспечать», 2021. – С.123–126.
5. Латышев, О. Ю. Включение в наземные транспортные артерии метрополитена Дубая подземных и подводных линий / О. Ю. Латышев [и др.] // Молодежь и наука: от исследовательского поиска к продуктивным решениям: сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Апрель 2023 г. – Иркутск : ГБПОУ ИО «ИКАТ и ДС», 2023. – Том 2 – С. 11–17.
6. Латышев, О. Ю. Вопросы архитектуры и искусства в социализации учащихся, студентов и учёных / О. Ю. Латышев [и др.] // – Саарбрюккен : LAP Lambert Academic publishing. – 2018. – 109с.
7. Латышев, О. Ю. Влияние деятельности современных российских архитекторов и дизайнеров на облик Дубая / О. Ю. Латышев [и др.] // Большая Евразия: Развитие, безопасность, сотрудничество: материалы Пятой международной научно-практической конференции «Большая Евразия: национальные и цивилизационные аспекты развития и сотрудничества». Ежегодник. Вып. 6. / РАН. ИНИОН, отд. науч. сотрудничества; отв. ред. В. И. Герасимов – М. : 2023. – Ч. 2. – С. 336–341.
8. Нетрадиционная энергетика / С. В. Алексеенко // Большая российская энциклопедия : [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов. — М. : Большая российская энциклопедия, 2004—2017.
9. Сидорович, В. Мировая энергетическая революция: Как возобновляемые источники энергии изменят наш мир / В. Сидорович. – М. : Альпина Паблишер, 2015. – 208 с.
10. Ушаков, В. Я. Возобновляемая и альтернативная энергетика: ресурсосбережение и защита окружающей среды / В. Я. Ушаков. – Томск : СПБ Графикс, 2011. – 137 с.
11. Latysheva, P. A. APPLICATION OF CREATIVE INDUSTRIES IN THE IMPLEMENTATION PROCESS OF DUBAI CREATIVE ECONOMY STRATEGY TERMS / P. A. Latysheva, O. Yu. Latyshev, M. Luisetto // ТУРИЗМ И КРЕАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКОНОМИКЕ ВПЕЧАТЛЕНИЙ: Материалы Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) 30 мая 2023 г. / под ред. Лисенковой А. А., Ширинкина П. С. – Пермь: Перм. гос. ин-т культуры.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ПУНКТОВ РЕДУЦИРОВАНИЯ ГАЗА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЕТЕЙ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

*И. Н. Макаров<sup>1</sup>, Э. С. Юнусов<sup>2</sup>, О. В. Пазушкина<sup>3</sup>, Ю. П. Марцев<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Магистрант, Ульяновский государственный технический университет,  
г. Ульяновск, Россия, makarov@ulgaz.ru

<sup>2</sup>Магистрант, Ульяновский государственный технический университет,  
г. Ульяновск, Россия, yunusov@ulgaz.ru

<sup>3</sup>Доцент, Ульяновский государственный технический университет,  
г. Ульяновск, Россия, o.pazushkina@yandex.ru

<sup>4</sup>Доцент, Ульяновский государственный технический университет,  
г. Ульяновск, Россия, martsev65@mail.ru

### **Аннотация**

Авторами рассмотрено применение технических решений для редуцирования и измерения расхода газа. Так, применение модульного оборудования для пунктов редуцирования газа позволяет реализовывать линии редуцирования со значительно меньшими общими затратами, а также с меньшими габаритными размерами, что позволит уменьшить габариты шкафа, блок-контейнера или стационарного здания пунктов редуцирования газа.

**Ключевые слова:** пункт редуцирования газа, газовые сети, прогрессивная безопасность.

## MODERNIZATION OF GAS REDUCTION POINTS DURING OPERATION OF GAS DISTRIBUTION NETWORKS

*I. N. Makarov, E. S. Yunusov, O. V. Pazushkina, Yu. P. Martsev*

### **Abstract**

The authors consider the application of technical solutions for reducing and measuring gas flow. The use of modular equipment for gas reduction points makes it possible to implement reduction lines with significantly lower total costs. Well as with smaller overall dimensions, which will reduce the dimensions a block container and a stationary building of the gas-regulating posts.

**Keywords:** gas-regulating posts, gas networks, progressive safety.

Реконструкция или строительство сетей газораспределения предполагает не только проведение ряда работ по оценке технического состояния, но и учет эволюционных тенденций в технике.

Основные цели при проектировании газовых сетей:

1. Обеспечение бесперебойности подачи газа, в том числе и в случае аварий в сети или на пунктах редуцирования газа.

2. Увеличение уровня безопасности сетей газораспределения и, прежде всего, пунктов редуцирования газа, особенно для конечных потребителей.

3. Сведение к минимуму стоимости инвестиций и оптимизация степени использования оборудования.

Вопрос обеспечения всех этих целей, особенно в плане проектирования и строительства пунктов редуцирования газа и узлов (пунктов) учета газа, которые с точки зрения технологии представляют собой наиболее важную часть распределительной системы, представляет значительные сложности.

Достигнутый уровень технологий на сегодняшний день делает доступными инновационные решения, которые позволяют реализовывать системы для редуцирования и измерения расхода газа.

Технические решения могут быть реализованы посредством применения линий редуцирования с оборудованием, которое можно определить, как обладающее «прогрессивной безопасностью» по предотвращению повышения давления сверх требуемых значений по причине возможных неисправностей.

Конфигурация линии редуцирования, оснащенной оборудованием, обладающим «прогрессивной безопасностью», как правило, следующая (рисунок 1).

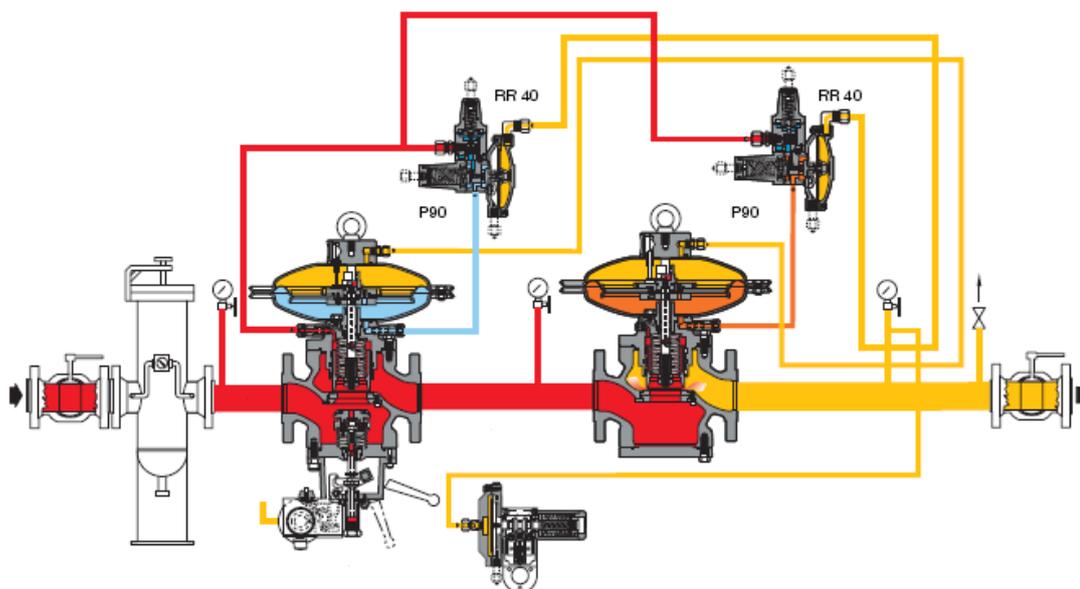


Рисунок 1 – Линия редуцирования с прогрессивной безопасностью

Классическое решение состоит в том, чтобы предусматривать линию редуцирования с регулятором давления и предохранительным запорным клапаном в качестве устройства по защите от аварийного увеличения контролируемого давления.

Бесперебойность работы может гарантироваться применением второй линии редуцирования, выполняющей функцию резервной и имеющую характеристики, как минимум такие же, как и рабочая линия.

Каждая линия, следовательно, имеет коэффициент безопасности, равный 1.

Это означает, что увеличение выходного давления по причине неисправности регулятора вызывает срабатывание предохранительного запорного клапана (ПЗК) с последующим выводом из эксплуатации самой линии редуцирования.

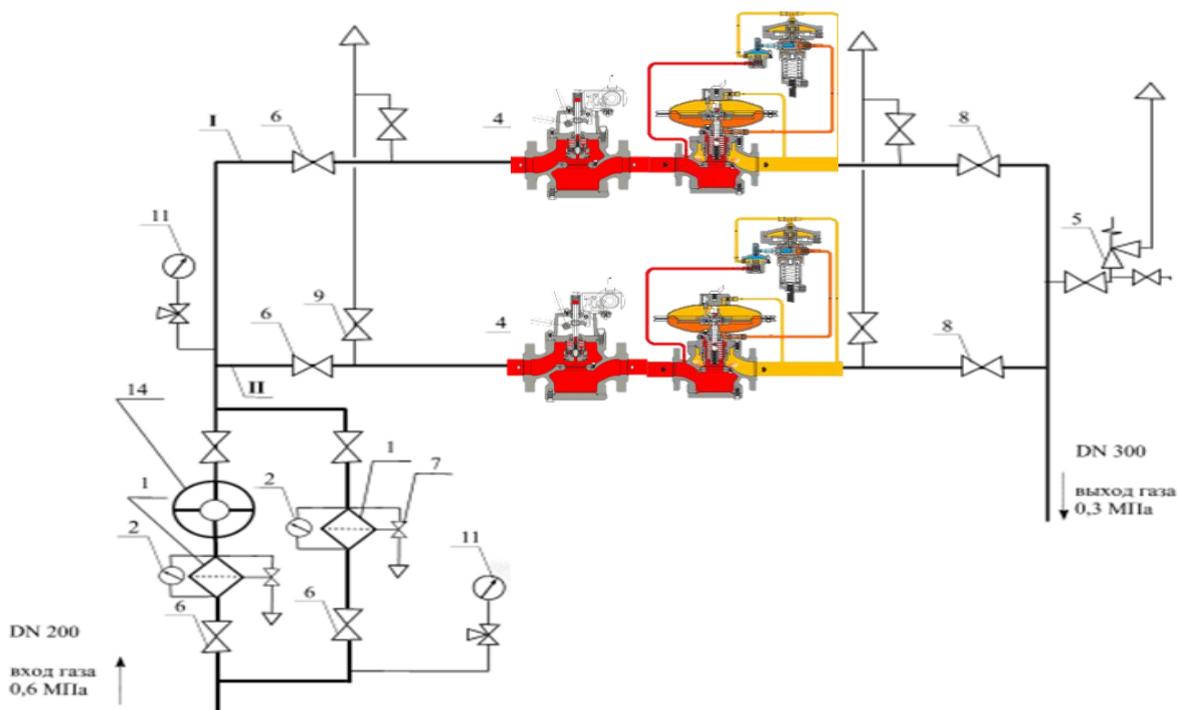


Рисунок 2 – Основная и резервная линии редуцирования

В ходе проектных работ, основанных на применении передовых технологий, применяются соответствующие комбинации технических устройств, обладающих «прогрессивной безопасностью», что может увеличить степень безопасности каждой линии редуцирования до коэффициента 3. Это означает, что до прекращения работы линии редуцирования может произойти до трех неисправностей.

В этом случае очевидно, что необходимость во второй линии с функциями резервной становится излишней и, что более целесообразно, вторая линия редуцирования может устанавливаться с функциями увеличения общего расхода через пункт редуцирования газа, а не просто как резерв основной линии.

Снижение стоимости конструкции возможно посредством применения технологий, которые позволяют добавлять в базовое техническое устройство редуцирования давления один или несколько блоков или модулей, что позволит увеличить многофункциональность регулятора давления, входящего в состав линии редуцирования.

Оборудование, делающее возможным такие решения, должно быть спроектировано и произведено с соблюдением критерия модульности, и его можно назвать «модульным оборудованием». Эта особая конструктивная характеристика позволяет, например, сначала предусматривать только один регулятор, а затем в последующем, если того требуют фактические условия эксплуатации, добавить дополнительные модули, например, глушитель и регулятор-монитор.

Применение модульного оборудования для пунктов редуцирования газа позволяет осуществлять структурную экономию.

Модульность конструкции позволяет реализовывать линии редуцирования со значительно меньшими общими затратами (оборудование и трубопроводы), а также с меньшими габаритными размерами, что позволит уменьшить габариты шкафа, блок-контейнера или стационарного здания ПРГ.

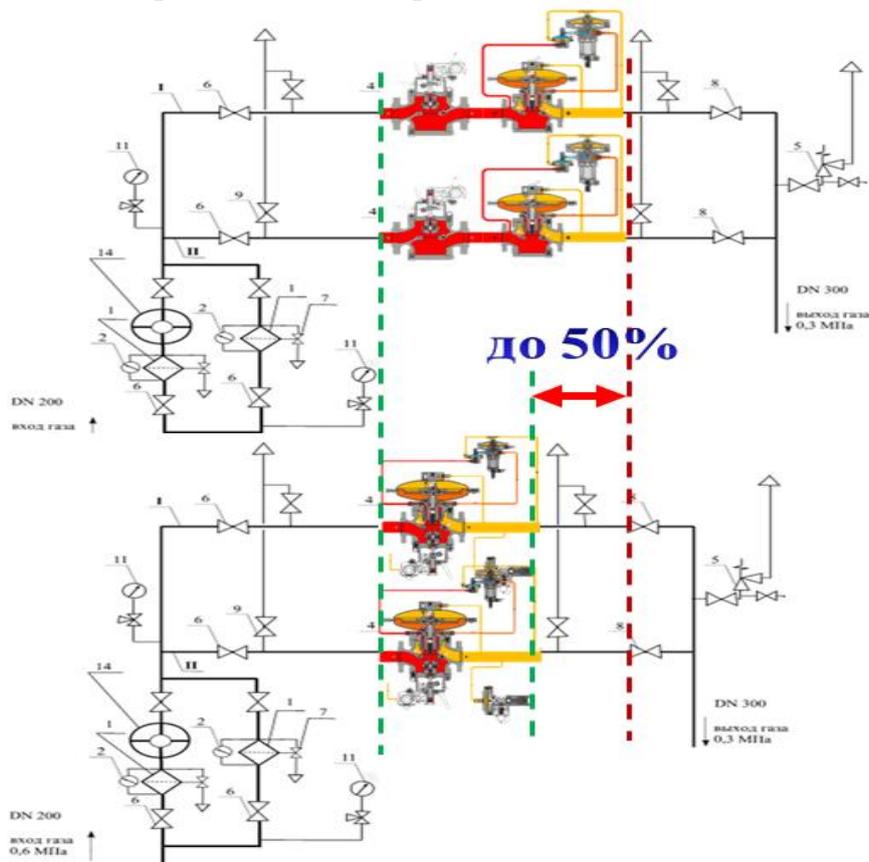


Рисунок 3 – Модульное оборудование

Наиболее инновационное решение представлено недавно появившимися на рынке так называемыми «трехвалентными» регуляторами, которые позволяют встраивать в один корпус клапана сразу три функции: регулятор, регулятор-монитор и ПЗК.

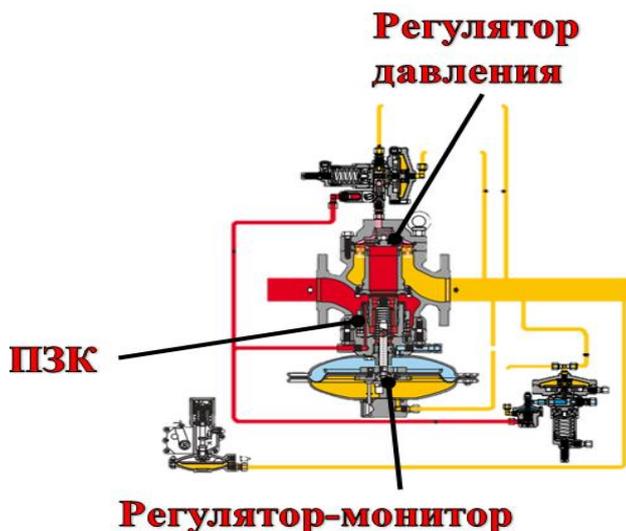


Рисунок 4 – Трехвалентный регулятор

Такой синтез оборудования позволяет максимально сокращать габаритные размеры, в том числе ограждающих конструкций, и еще более минимизировать стоимость сборки пунктов редуцирования газа.

Линии, выполненные с оборудованием, обладающим «прогрессивной безопасностью», могут применяться для реализации систем с несколькими линиями редуцирования, где каждая линия выполняет функцию увеличения расхода и/или резервной линии.

Каждая линия может применяться до предела своего максимального проектного расхода и с применением соответствующих распределителей расхода.

Срабатывание каждой линии и связь между ними происходит автоматически при помощи логики настройки регуляторов давления каждой линии.

Технология «трехвалентных регуляторов» не только делает возможным реализацию линий редуцирования давления меньших размеров в традиционных формах, таких как шкафы и/или стационарные сооружения, но и предоставляет возможность реализации узлов редуцирования, которые могут устанавливаться полностью под землей и размещаться в герметичном контейнере.

Таким образом, современная нормативная база в совокупности с доступными к применению техническими устройствами уже сейчас позволяет использовать широкий спектр решений в области обеспечения бесперебойной подачи газа потребителю.

### **Список цитированных источников**

1. ГОСТ Р 34670-2020. Системы газораспределительные. Пункты редуцирования газа: межгосударственный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 октября 2020 г. № 844-ст: введен впервые: дата введения 2021-06-01 / разработан АО «Гипрониигаз», ООО «Газпром межрегионгаз». 2021. – 24 с.
2. ГОСТ Р 34741-2021. Системы газораспределительные. Требования к эксплуатации сетей газораспределения природного газа: межгосударственный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 октября 2021 г. № 1191-ст: введен впервые: дата введения 2022-06-01 / разработан АО «Гипрониигаз». – Москва: Российский институт стандартизации, 2021. – 110 с.
3. Межгосударственный стандарт ГОСТ 34011-2016 «Системы газораспределительные. Пункты газорегуляторные блочные. Пункты редуцирования газа шкафные. Общие технические требования»: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 апреля 2017 г. № 281-ст. 2016. – 21 с.
4. Патент RU №2747394, МПК F17D 1/04. Установка настройки регулятора давления газа, дата публикации 04.05.2021 / А. М. Русь, В. Б. Григорчук, Д. В. Рощин, П. В. Сермяжко, П. Л. Жолнерчик.

5. Патент RU№ 72526, МПК F17D 1/04. Газорегуляторный пункт в блочном исполнении, дата публикации 20.04.2008 / Р. Е. Агабабян, М. А. Балаев, В. П. Похмельнова, К. Г. Хвостов.
6. СТО Газпром газораспределение 2.8. – 2013 Методика расчета эффективности энергосберегающих и инновационных мероприятий при разработке и реализации программ ОАО «Газпром газораспределение»: утвержден и введен в действие Приказом ОАО «Газпром газораспределение» от 15 апреля 2013 г. № 126 / разработан ОАО «Газпром промгаз». – Санкт-Петербург : 2013. – 134 с.
7. Ефремова, Т. В. Исследование математической модели определения пропускной способности регуляторов давления газа / Т. В. Ефремова, А. С. Мясников // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2020. № 1 (31). С. 11–16.
8. Удовенко, В. Е. Об обеспечении необходимой безопасности и повышения энергоэффективности сетей газораспределения и гаопотребления / В. Е. Удовенко // Вестник МГСУ / Московский государственный строительный университет : 2011. – № 7. С. 542–548.

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КАДАСТРА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ (НА ПРИМЕРЕ БРЕСТА)

*О. П. Мешик<sup>1</sup>, М. В. Борушко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> К. т. н., доцент, декан факультета инженерных систем и экологии УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,  
omeshyk@gmail.com

<sup>2</sup> Магистр технических наук, аспирант кафедры природообустройства, старший преподаватель кафедры лингвистических дисциплин и межкультурных коммуникаций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, borushko.marina@mail.ru

### **Аннотация**

В работе представлен систематизированный свод данных интегральных климатических характеристик гелиоэнергетических ресурсов, который включает в себя данные о продолжительности солнечного сияния, облачности, солнечной радиации и энергетической освещенности территории Бреста, в качестве возможного примера при создании гелиоэнергетического кадастра Республики Беларусь.

**Ключевые слова:** гелиоэнергетический кадастр, продолжительность солнечного сияния, облачность, солнечная радиация, энергетическая освещенность территории.

## DATA CONTENT FOR SOLAR ENERGY CADASTRE OF BELARUS (WITH BREST AS AN EXAMPLE)

*A. Meshyk<sup>1</sup>, M. Barushka<sup>2</sup>*

### **Abstract**

The paper presents a dataset of integral climate parameters of solar energy resources in Brest (Belarus). It includes data about sunshine duration, cloudiness, solar radiation, and solar irradiance in Brest. The research could serve as an example to compile a solar energy cadastre of Belarus.

**Keywords:** solar energy cadastre, sunshine duration, cloudiness, solar radiation, solar irradiance.

**Введение.** Гелиоэнергетический кадастр предоставляет информацию об условиях естественной освещенности территории, обеспечивает критически важные отрасли экономики (энергетика, сельское хозяйство, промышленность, строительство, транспорт и др.) данными о распределении гелиоэнергетического потенциала по определенной территории и дает возможность выделить районы в разной степени пригодные для локализации и использования установок солнечной энергетики.

Актуальность данного исследования обусловлена отсутствием в Беларуси детально разработанного гелиоэнергетического кадастра, характеризующего режим распределения энергии солнца по территории Беларуси.

Объектом исследования являются данные актинометрических наблюдений (фактическая продолжительность солнечного сияния (ПСС), средняя ПСС за день с солнцем, возможная ПСС) и характеристик облачности (количество дней пасмурных по нижней и общей облачности, количество дней ясных по нижней и общей облачности, балл нижней и общей облачности), наблюдаемые на метеостанции «Брест» с 1979 по 2022 годы и анализируемые в данном исследовании, а также результаты расчетов энергетической освещенности данной территории.

Основной целью исследования является систематизированный свод данных интегральных климатических характеристик гелиоэнергетических ресурсов по метеостанции «Брест» в условиях изменяющегося климата.

Задачами исследования являются:

- изучение специфики гелиоэнергетических характеристик (продолжительность солнечного сияния, режим облачности) по метеостанции «Брест»;
- статистический анализ характеристик гелиоэнергетических ресурсов Бреста;
- оценка временной изменчивости характеристик гелиоэнергетических ресурсов Бреста;
- изучение методики составления кадастра гелиоэнергетического потенциала исследуемой территории;
- систематизация и сведение данных, необходимых для составления гелиоэнергетического кадастра Республики Беларусь на примере Бреста.

**Материалы и методы.** В настоящем исследовании использованы материалы Справочника по климату Беларуси (Часть 5, 6) [1, 2] государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды», характеризующие радиационный режим и облачность территории Беларуси. Временные ряды за репрезентативный 43-летний период с 1979 по 2022 годы приняты по метеостанции «Брест» в соответствии с данными климатического кадастра Республики Беларусь, публикуемыми в метеорологических ежемесячниках [3] и включают данные о фактической ПСС, средней ПСС за день с солнцем, возможной ПСС, количестве дней пасмурных по нижней и общей облачности, количестве дней ясных по нижней и общей облачности, балле нижней и общей облачности.

В работе реализованы методы статистической обработки данных наблюдений, в частности, методы корреляционного и регрессионного анализа, аналитических расчетов, анализ временных рядов и др. Обработка данных расчетов проводилась с использованием пакетов прикладных программ Microsoft Office.

**Результаты и обсуждение.** Кадастр – это систематизированный свод сведений, официально составленный на основе периодических или непрерывных наблюдений (например, земельный кадастр, водный, лесной и др.) [4]. В Респуб-

лике Беларусь детально разработаны Государственный земельный кадастр, Государственный водный кадастр и др. Также существует Государственный кадастр возобновляемых источников энергии (ВИЭ), который помимо прочего включает в себя раздел «Энергия солнца» [5]. Он содержит данные о количестве установок и площадок возможного и фактического размещения установок по использованию ВИЭ, о производителях энергии из ВИЭ, справочные документы, в том числе о наилучших доступных технических методах в области ВИЭ, о мощности действующих установок по использованию ВИЭ, об отпуске электрической и (или) тепловой энергии, производимой из ВИЭ, о сокращении выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух в Республике Беларусь [6], т. е., количественные показатели уже достигнутых результатов внедрения ВИЭ в Беларуси. К сожалению, Государственный кадастр ВИЭ не содержит информацию об энергетическом (в частности, гелиоэнергетическом) потенциале территории Беларуси, которая была бы полезна при проведении проектных работ в различных сферах экономики. Данная работа – это попытка представить систематизированный свод данных, характеризующих гелиоэнергетический потенциал Бреста.

Для оценки потенциальных гелиоресурсов рекомендуют учитывать следующие климатические характеристики [7]:

1. Общие климатические характеристики, необходимые для оценки природного гелиопотенциала:

- Продолжительность солнечного сияния по месяцам и за год.
- Средняя продолжительность солнечного сияния за день с солнцем.
- Число дней без солнца.
- Отношение наблюдавшейся продолжительности солнечного сияния к возможной.
- Суммы прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность.
- Максимальный суточный приход солнечной радиации.

2. Специализированные характеристики для решения задач гелиоэнергетики (оценки солнечных ресурсов, принципиально доступных для использования, и технически реализуемых солнечных энергетических ресурсов):

- Приход солнечной радиации на наклонные поверхности.
- Технически реализуемые солнечные энергетические ресурсы: выработка тепловой энергии; выработка электрической энергии.

Данная работа представляет общие климатические характеристики и включает в себя осредненные данные наблюдений по метеостанции «Брест», а также результаты вычислений, методики которых представлены в работах [8, 9, 10]. Полученные данные сведены в таблицу 1, где приняты следующие обозначения:

- $SS$  – продолжительность солнечного сияния (часы);
- $SS/SS_{\text{возм}}$  – отношение наблюдавшейся продолжительности солнечного сияния к возможной (%);

- $SS_{\text{ср. за день с солнцем}}$  – средняя продолжительность солнечного сияния за день с солнцем (часы);
- $P$  – число дней без солнца (общая облачность);
- $U$  – среднемесячное и годовое количество общей облачности (баллы);
- $Q$  – среднемесячная и годовая суммарная солнечная радиация ( $\text{МДж}/\text{м}^2$ ), рассчитанная по методике [8];
- $Q$  – среднемесячная и годовая интенсивность солнечной радиации ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ), рассчитанная из соотношения  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2 = 3,6 \text{ МДж}/\text{м}^2$ ;
- $Q_{\text{ср за день}}$  – интенсивность солнечной радиации в среднем за день ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ).

**Таблица 1** – Основные характеристики гелиоэнергетического кадастра (станция «Брест»)

Показатель	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
$SS$ (часы)	44, 1	70, 1	139, 2	194, 1	262, 1	270, 3	274, 5	256, 2	172, 7	122, 8	48, 7	34, 6	1886, 9
$SS/SS_{\text{возм}}$ (%);	16, 9	24, 8	36,7	45,9	53,9	53,4	54,1	56,7	44,7	36,9	18, 6	14, 5	41,8
$SS_{\text{ср. за день с солнцем}}$ (часы)	3,3	4,4	5,8	7,5	9,0	9,5	9,3	8,6	6,6	5,1	3,5	2,9	6,5
$P$ (дней)	17, 1	13, 9	11,0	9,4	7,2	7,3	6,1	5,3	8,3	10,5	15, 5	18, 0	130,0
$U$ (балл)	7,9	7,3	6,5	6,0	5,7	6,0	5,8	5,3	5,8	6,2	7,8	7,9	6,5
$Q$ ( $\text{МДж}/\text{м}^2$ )	73	143	291	431	576	618	610	500	341	206	94	51	3933
$Q$ ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ )	20	40	81	120	160	172	170	139	95	57	26	14	1093
$Q_{\text{ср за день}}$ ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ )	0,6	1,4	2,6	4,0	5,2	5,7	5,5	4,5	3,2	1,8	0,9	0,5	3,0

В таблице представлены общие климатические характеристики, необходимые для оценки природного гелиоэнергетического потенциала территории. Их можно дополнить такими специализированными данными, как продолжительность периода за сутки с энергетической освещенностью  $Q \geq 0,60 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  при средних условиях облачности; количество энергии ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ), вырабатываемое за сутки/месяц/год фотоэлектрической батареей со следящей за солнцем поверхностью и с неподвижной поверхностью и др.

**Заключение.** В работе представлен систематизированный свод данных интегральных климатических характеристик гелиоэнергетических ресурсов по метеостанции «Брест» для последующего их применения при создании гелиоэнергетического кадастра Республики Беларусь, целью которого является предоставить информацию об условиях энергетической освещенности территории, обеспечить различные отрасли экономики (энергетика, сельское хозяйство, промышленность, строительство, транспорт и др.) данными о распределении гелиоэнергетического потенциала по территории и выделить районы, в разной степени пригодные для размещения

и эксплуатации установок солнечной энергетики. В перспективе для удобства пользователей имеет смысл составить цифровой гелиоэнергетический кадастр Республики Беларусь в виде электронной интерактивной карты с информацией о гелиоэнергетическом потенциале территории в каждой административно-территориальной единице Республики Беларусь.

### Список цитированных источников

1. Справочник по климату Беларуси. Часть 5. Влажность воздуха. Солнечное сияние. Метеорологическая дальность видимости / Под. общ. ред. В. И. Мельника. – Минск : Минприроды, 2007. – 48 с.
2. Справочник по климату Беларуси. Часть 6. Облачность. Атмосферные явления / Под. общ. ред. В. И. Мельника. – Минск : Минприроды, 2007. – 56 с.
3. Климатический кадастр Республики Беларусь. Метеорологический ежемесячник. – Минск : Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 1979–2022 гг.
4. Кадастр // Исландия — Канцеляризм. — М. : Большая российская энциклопедия, 2008. — С. 374. — (Большая российская энциклопедия : [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов ; 2004—2017, т. 12).
5. Государственный кадастр возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] / Минприроды Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – Режим доступа: [http://www.minpriroda.gov.by/ru/new\\_url\\_19948904-ru/](http://www.minpriroda.gov.by/ru/new_url_19948904-ru/). – Дата доступа: 20.04.2023.
6. Об утверждении Инструкции о некоторых вопросах ведения государственного кадастра возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 29 августа 2011 г., № 29 8/24091 // Национальный реестр правовых актов РБ. – Режим доступа: [https://pravo.by/pdf/2011-99/2011\\_99\\_8\\_24091.pdf](https://pravo.by/pdf/2011-99/2011_99_8_24091.pdf). – Дата доступа: 28.08.2023
7. Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики / под ред. Н. В. Кобышевой. – СПб, 2008. – 336 с.
8. Мешик, О. П. Оценка гелиоэнергетических ресурсов климата Беларуси / О. П. Мешик, М. В. Борушко, В. А. Морозова // Вестник БрГТУ. – 2020. – № 2(120) : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 93–99. <https://doi.org/10.36773/1818-1212-2020-120-2.1-93-99>.
9. A. Meshyk, M. Barushka, V. Marozava, E. Sarkynov, An. Meshyk, Climate Resource Potential to Develop Solar Power in Belarus, E3S Web Conf., 212 (2020) 01012, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021201012>
10. Мешик, О. П. Современные оценки характеристик солнечной радиации территории Республики Беларусь / О. П. Мешик, М. В. Борушко, В. А. Морозова // Вестник БрГТУ. – 2023. – № 2(131) : Технические науки (строительство, машиностроение, геоэкология); экономические науки. – С. 115-122. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-131-2>.

## О РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ КРУГОВОЙ АРКИ

*Сердар Назаров<sup>1</sup>, Мухаметберды Рахимов<sup>2</sup>, Шатлык Аннабердиев<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> кандидат технических наук, ректор Государственного энергетического института Туркменистана (ГЭИТ), г. Мары, Туркменистан

<sup>2</sup> доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой “Общей физики, математики и информатики – ОФМИ” ГЭИТ, г. Мары, Туркменистан e-mail: tdei@tdei.edu.tm

<sup>3</sup> преподаватель кафедры ОФМИ ГЭИТ, г. Мары, Туркменистан

### Аннотация

В сооружениях, имеющих достаточно большую высоту или длину, определение параметров устойчивых режимов и изучения модели оптимального конструирования круговой арки является важной задачей современной прикладной науки. Рассматривается задача оптимального моделирования динамики смещений частей выпуклой круговой арки при внешнем давлении. В качестве управляющих функций принимаются функции, характеризующие внешние силы, действующие на арку. Предполагается, что один конец арки закреплен шарнирно, другой заземлен. В качестве критерий оптимальности принимается энергетический функционал. Для решения задачи синтеза оптимального управления применены методы динамического программирования и спектрального разложения. Найдены синтезирующие оптимальные управления и аналитическое решение счетной системы уравнений типа Риккати.

**Ключевые слова:** уравнения Беллмана, уравнения Риккати, оптимальное управление

## ON SOLVING THE PROBLEM OF OPTIMAL DESIGN OF THE CIRCULAR ARCH

*Serdar Nazarov<sup>1</sup>, Mukhametberdy Rakhimov<sup>2</sup>, Shatlyk Annaberdiyev<sup>3</sup>,*

### Abstract

In structures that have a fairly large height or length, determining the parameters of stable modes and studying the model of optimal design of the circular arch are an important task of modern applied science. The task of optimal modeling of the dynamics of displacements of parts of the convex circular arch is considered at external pressure. As control functions, functions characterizing the external forces acting on the arch are accepted. It is assumed that one end of the arch is mounted articulated, the other is pinched. As an optimality criterion, energy functionality is accepted. To solve the problem of the synthesis of optimal controls, dynamic programming and spectral decomposition methods are used. Synthesizing optimal controls and analytical solution of the counting system of Riccati type equations were found.

**Keywords:** Bellman equations, Riccati equations, optimal controls

**Введение.** Применение метода динамического программирования в системах с распределенными параметрами имеет особое важное место в решении задач оптимального моделирования физико-технических процессов. С начала первых публикаций [см. библиографию в 1–12] по оптимальному управлению системами с распределенными параметрами прошло более шестидесяти лет. В течение этого периода было опубликовано много работ и были изданы монографии (см. библиографию в [1–11]), посвященные изучению специальных вопросов этой обширной области прикладной математики. Тем не менее и на сегодняшний день одной из актуальных проблем является обоснованное применение известных методов конечномерных систем к задачам оптимального управления системами с распределенными параметрами. Отметим, что метод динамического программирования нашел широкое применение в решении задач оптимизации технических процессов [см. библиографию в 1–5, 7, 8, 11], и оно связано с тем, что этот метод позволяет решить проблему синтеза [см. библиографию в 3, 7]. Отсюда вытекает актуальность проблемы применения метода динамического программирования в задачах оптимального управления колебательными системами.

Задачи минимизации квадратичных функционалов занимают важное место в теории управления бесконечномерных систем, что может быть объяснено тем, что квадратичные функционалы выражают энергию рассматриваемой физической системы [7, 9, 10, 12]. Известно, что задача синтеза при минимуме строго выпуклого квадратичного функционала для линейного уравнения управляемого объекта приводит к решению нелинейного уравнения типа Риккати. Необходимость полного исследования этого уравнения продиктовано из практической применимости этого уравнения. Применение спектрального разложения дифференциальных операторов для определения явного решения нелинейного уравнения Риккати имеет большое теоретическое и практическое значения.

В сооружениях, имеющих достаточно большую высоту или длину, определение параметров устойчивых режимов и изучения модели оптимального конструирования круговой арки являются важной задачей современной прикладной науки [12]. Кругу этих проблем посвящена настоящая работа.

### 1. Постановка задачи оптимального управления

Рассмотрим изогнутый тонкий стержень постоянного сечения, ось которого является дугой с радиусом  $a$ . Стержень подвержен действию равномерного одностороннего внешнего давления  $p$ ;  $\alpha$  – жесткость стержня на изгиб [12]. Тогда динамику смещений  $u = u(t, x)$  частицы изогнутого тонкого стержня (выпуклой круговой арки) при наличии дополнительной внешней силы  $F(t, x)$  можно представить в виде:

$$u_{tt} - Au = q_1(x)p_1(t) + q_2(x)p_2(t) + f(t, x) \equiv F(t, x), \quad (1)$$

где  $A$  – дифференциальный оператор шестого порядка:

$$Au \equiv u^{VI} + \alpha_1 u^{IV} + \alpha_2 u'', \quad \alpha_1 = \frac{2}{a^2} + \frac{pa}{\alpha}; \quad \alpha_2 = \frac{1}{a^4} + \frac{p}{\alpha a}.$$

В качестве управляющих функций примем  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ ,  $f(t, x)$ . Функции  $q_1(x)$  и  $q_2(x)$  в правой части (12) считаются заданными и характеризуют форму

(геометрическую) внешних сил, действующих на арку по оси  $Ox$ . Функция  $f(t, x)$  выражает произвольную внешнюю силу. Заметим, что во многих задачах управлений по границе (неоднородные граничные условия) с помощью специальной подстановки задача приводится к однородной, но с правой частью типа  $F(t, x)$ , таким образом можно считать, что рассматривается и тот случай, когда управление осуществляется с границы.

Начально-граничные условия:

$$\begin{cases} u(0, x) = \varphi_1(x), \quad u'_t(0, x) = \varphi_2(x), \\ u(t, 0) = u_x(t, 0) = u_{xxx}(t, 0) = 0, \quad x = 0, \text{ (шарнирное закрепление).} \\ u(t, l) = u_x(t, l) = u_{xx}(t, l) = 0, \quad x = l \text{ (защемление)} \end{cases} \quad (2)$$

В качестве критерий оптимальности принимается интеграл:

$$\begin{aligned} I[t_0, p_1(t), p_2(t), f(t, \cdot)] &= \int_{t_0}^T \int_0^l [\alpha_1 u^2 + \alpha_2 u_t^2 + \beta_0 f^2(t, x)] dx dt + \\ &+ \int_{t_0}^T [\beta_1 p_1^2(t) + \beta_2 p_2^2(t)] dt + \int_0^l [a_0 u^2(T, x) + a_1 u_t^2(T, x)] dx, \quad (3) \\ &a_0^2 + a_1^2 \neq 0, \quad \alpha_1 \geq 0, \quad \alpha_2 \geq 0, \quad \beta_0^2 + \beta_1^2 + \beta_2^2 \neq 0. \end{aligned}$$

Требуется найти управляющие функции  $f(t, x) = f(t, w)$ ,  $p_1(t) = p_1(t, w)$ ,  $p_2(t) = p_2(t, w)$  как вектор-функции состояния  $w = w(t, x) = \{u(t, x), u_t(t, x)\}$  – решения задачи (1), (2) и такие, чтобы функционал (3) принимал минимальное возможное значение ( $T$  – фиксирован).

## 2. Применение метода динамического программирования

Для решения задачи синтеза оптимального управления (1)-(3) применяем метод динамического программирования и метод спектрального разложения. Введем функционал Беллмана ( $t_0 \leq t \leq \tau < T$ ):

$$S = S[t, w(t, \cdot)] = \min_{p_1, p_2, f} I[t, p_1, p_2, f], \quad w = w(t, x) = \{u(t, x), u_t(t, x)\}.$$

При  $t = t_0$  значения функционала  $S[t, w(t, \cdot)]$  выражает минимум интеграла (3), т.е.  $S[T, w(T, \cdot)] = \int_0^l [a_0 u^2(T, x) + a_1 u_t^2(T, x)] dx$ ,

$$S[t_0, w(t_0, \cdot)] = \min_{p_1(t), p_2(t), f(t, \cdot), t \in [t_0, T]} I[t_0, p_1(t), p_2(t), f(t, \cdot)].$$

Предположим, что функционал  $S = S[t, w(t, \cdot)]$ ,  $t_0 \leq t \leq T$  непрерывно дифференцируем по  $t \in [t_0, T]$  и имеет функциональную производную Фреше  $\Phi(t, w; \Delta w)$  в  $L_2(0, l) \oplus L_2(0, l)$ , то есть имеет частные функциональные производные по компонентам вектор-функции  $w = w(t, x) = (u(t, x), u_t(t, x))$  в  $L_2(0, l)$ . Тогда эту функциональную производную по  $\Delta w$  можно представить в виде:

$$\Phi(t, w; \Delta w) = \int_0^l [\Delta u(t, x) v_1(t, x) + \Delta u_t(t, x) v_2(t, x)] dx, \quad (4)$$

где  $v = v(t, x) = (v_1(t, x), v_2(t, x))$  определяется единственным образом согласно теореме Рисса о непрерывном функционале. Для определения функционала  $S = S[t, w(t, \cdot)]$ ,  $t_0 \leq t \leq T$  с учётом (1) и (4), получим нелинейное

интегро-дифференциальное уравнение Беллмана в частных функциональных производных [7]:

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = \min_{p_1(t), p_2(t), f(t, \cdot), t \in [t_0, T]} \{ (u_t, v_1) + (Au, v_2) + p_1(t)(q_1, v_2) + p_2(t)(q_2, v_2) + (f, v_2) + \int_0^l [\alpha_1 u^2 + \alpha_2 u_t^2 + \beta_0 f^2(t, x)] dx + [\beta_1 p_1^2(t) + \beta_2 p_2^2(t)] \}, \quad (5)$$

$$S[T, w(T, x)] = \int_0^l [a_0 u^2(T, x) + a_1 u_t^2(T, x)] dx, \quad t_0 \leq t < T, \quad (6)$$

где  $v = v(t, x) = (v_1(t, x), v_2(t, x))$  есть функциональная производная Фреше функционала  $S[t, w(t, \cdot)]$  в  $L_2(0, l) \oplus L_2(0, l)$  и может быть определена из интеграла (4). Из уравнения (5) получен формулы для оптимального синтеза:

$$f(t, x) = -\left(\frac{1}{2\beta_0}\right) v_2(t, x);$$

$$p_1(t) = -\left(\frac{1}{2\beta_1}\right) (q_1, v_2); \quad p_2(t) = -\left(\frac{1}{2\beta_2}\right) (q_2, v_2). \quad (7)$$

Подставив значения управляющих функций из (7) в уравнении Беллмана (5), для определения оптимального функционала  $S[t, w(t, \cdot)]$  получим нелинейное уравнение без условия *min*:

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = (u_t, v_1) + (Au, v_2) - \left(\frac{1}{4\beta_0}\right) v_2^2(t, x) - (1/4\beta_1)(q_1, v_2)^2 - (1/4\beta_2)(q_2, v_2)^2. \quad (8)$$

Заметим, что управляющие функции определены с помощью функциональной производной  $v_2(t, x)$  функционала  $S$ . Решение уравнения (8) с условием (6) ищем в квадратичной форме:

$$S[t, w(t, \cdot)] = \int_0^1 \int_0^1 w^*(t, x) K(t, x, y) w(t, y) dx dy,$$

$$K(t, x, y) = \|K_{ij}(t, x, y)\| \equiv K(t, y, x), \quad K_{12} = K_{21}.$$

Находим функциональные производные ( $i = 1, 2$ ):

$$v_i(t, x) = 2 \int_0^1 [K_{i1}(t, x, y) u(t, y) + K_{i2}(t, x, y) u_t(t, y)] dy,$$

Дальнейшее изложение материала удобно провести с применением операторных функций. Определим интегральный оператор  $K(t)$  в  $H = L_2(0, l)$  с ядром функции  $K(t, x, y)$ . Тогда функционал  $S[t, w(t, \cdot)]$  и его функциональную производную можно представить с помощью оператора  $K(t)$  в виде:

$$S[t, w(t)] = (K(t)w(t), w(t))_{H \oplus H}, \quad v(t) = 2K(t)w(t),$$

где  $K(t)$  матрица операторов и имеют вид:

$$K(t) = \begin{pmatrix} K_{11}(t) & K_{12}(t) \\ K_{12}(t) & K_{22}(t) \end{pmatrix}.$$

Для определения  $K(t)$  получим следующие системы дифференциально-операторных уравнений Риккати ( $\forall x \in D(A), b_i = q(q, K_{i2}x), i = 1, 2; K_{12}y \in D(A), K_{22}y \in D(A), \forall y \in H$ ):

$$\begin{cases} (K'_{11}x, y) + 2(AK_{12}x, y) - (\beta_0^{-1}K_{12}x + b_1, K_{12}y) + \alpha_1(x, y) = 0, \\ (K'_{12}x, y) + (AK_{22}x, y) + (K_{12}x, y) - (\beta_0^{-1}K_{12} + b_1, K_{22}y) = 0, \\ (K'_{22}x, y) + 2(K_{12}x, y) - (\beta_0^{-1}K_{22}x + b_2, K_{22}y) + \alpha_2(x, y) = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где элемент  $q \in H = L_2(0, l)$  соответствующий функции

$$m(\alpha, \beta) = \frac{1}{\beta_1} q_1(\alpha) q_1(\beta) + \frac{1}{\beta_2} q_2(\alpha) q_2(\beta).$$

Начальные условия:

$$(K_{11}(T)x, y) = a_0(x, y), (K_{12}(T)x, y) = 0, (K_{22}(T)x, y) = a_1(x, y), \quad (10)$$

Таким образом, практически для определения  $(f, p_1, p_2)$  нужно решить нелинейную задачу (9), (10). При известных операторах  $K_{ij}(t)$  найдем искомым  $\vartheta(t)$ . Наконец, подставляя уже найденное значение  $\vartheta_2(t)$ , получим закон синтезирующих оптимальных управлений.

Особенность системы (9), (10) заключается в её нелинейности, она изучена недостаточно и не выявлена структура ее решения в зависимости от спектрального свойства оператора  $A$  [7]. Основная трудность заключается в выборе функционального пространства и исследовании в нем регулярности оператора  $K(t)$ . В настоящей работе методом спектрального разложения получены явные представления оператора  $K(t)$ .

Поставленная выше задача оптимального моделирования (1)–(3) решена полностью; решение определено с помощью матрицы  $K(t, x, y)$ , т. е. оператора  $K(t)$  из расщепленной задачи (9)–(10). Найденны функциональные производные  $v_1(t, x)$ ,  $v_2(t, x)$ . Подставляя значение  $v_2(t, x)$  в (7), найдем оптимальные управляющие функции:

$$\begin{cases} f(t, w) = -\frac{1}{\beta_0} \int_0^l [K_{12}(t, x, y)u(t, y) + K_{22}(t, x, y)u_t(t, y)] dy, & i = 1, 2, \\ p_i(t) = -\frac{1}{\beta_i} \int_0^l \int_0^l q_i(x) [K_{12}(t, x, y)u(t, y) + K_{22}(t, x, y)u_t(t, y)] dy dx \end{cases} \quad (11)$$

В формулах (11) функции  $f(t, w)$ ,  $p_i(t, w)$  зависят от найденных из задачи (1), (2) оптимальных функций  $u(t, x)$ ,  $u_t(t, x)$ . Функции  $u(t, x)$ ,  $u_t(t, x)$  ( $0 < t < T$ ) определяются из исходной начально-краевой задачи для дифференциальных уравнений в частных производных при подстановке значений найденных управлений из (11) в (1). Из формулы (11) определены структуры оптимальных управляющих функций  $f(t, w)$ ,  $p_i(t, w)$ ,  $i = 1, 2$  т. е. законы внешних сил, конструируемых для погашения колебаний круговой арки.

### 3. Применение метода спектрального разложения

Из приведенной выше схемы решения задачи синтеза оптимального управления следует, что система уравнений Риккати (9) с начальными условиями (10) является важным структурным звеном в цепочке алгоритмов построения оптимального управления, т. е. в определении оптимального режима колебаний круговой арки. Для решения задачи (9), (10), т. е. системы уравнений типа Рик-

кати (9), элементы матрицы  $K(t)$  разлагают по собственным элементам оператора  $A$ , при этом получаемая для коэффициентов Фурье счетная система обыкновенных дифференциальных уравнений типа Риккати исследуются матричным способом. Мы приведем некоторые результаты исследований системы матричных дифференциальных уравнений, получаемые из системы (9),(10) операторно-дифференциального уравнения с нелинейностью типа Риккати.

Оператор  $A$ , порожденный граничной задачей (1)–(2) является самосопряженным оператором в  $H = L_2(0, l)$ , имеет в нем линейно независимую ортонормированную систему  $\{\varphi_k\}$  базисных элементов, соответствующие собственным значениям  $\lambda_k, k = 1, 2, \dots; \lambda_k \rightarrow \infty, k \rightarrow \infty$ .

Предположим, что  $q = \beta_1 = \beta_2 = 0$  и решение системы (9), (10) будем искать в виде:

$$K(t) = \sum_{k=1}^{\infty} S_k(t) \varphi_k \otimes \varphi_k, \quad K(t) = \|K_{ij}(t)\|, \quad K_{21}(t) = K_{12}(t),$$

$$S_k(t) = \begin{pmatrix} \alpha_k(t) & \beta_k(t) \\ \beta_k(t) & \gamma_k(t) \end{pmatrix}, \quad i, j = 1, 2; \quad (\varphi_k \otimes \varphi_k x = (x, \varphi_k) \varphi_k).$$

Тогда, полагая  $x = \varphi_k, y = \varphi_l$ , после замены  $t \rightarrow T - t$  (сохраняем прежние обозначения неизвестных  $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k$ ) получим следующую задачу Коши для счетной системы обыкновенных дифференциальных уравнений типа Риккати:

$$\begin{cases} \alpha'_k(t) + 2\lambda_k^2 \beta_k(t) + \beta_0^{-1} \beta_k^2(t) - \alpha_1 = 0 \\ \beta'_k(t) + \lambda_k^2 \gamma_k(t) - \alpha_k(t) + \beta_0^{-1} \gamma_k(t) \beta_k(t) = 0, \\ \gamma'_k(t) - 2\beta_k(t) + \beta_0^{-1} \gamma_k^2(t) - \alpha_2 = 0, \end{cases} \quad (12)$$

$$\alpha_k(0) = a_0, \quad \beta_k(0) = 0, \quad \gamma_k(0) = a_1, \quad k = 1, 2, \dots \quad (13)$$

Доказано локальная разрешимость задачи (12), (13). В том важном для практики частном случае, когда в задаче  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ , решение задачи (12), (13) получено в явном виде. Действительно, переходя к матричной записи систем (12)

$$S'_k(t) = -S_k(t)M_k - M_k^* S_k(t) + S_k(t)\tilde{M}S_k(t),$$

$$M_k = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\lambda_k^2 & 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{M} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \beta_0^{-1} \end{pmatrix}$$

и перемножив слева и справа обе части этого уравнения на  $S_k^{-1}(t) \equiv R_k(t)$ ,  $\det|S_k(t)| \neq 0$ , а также учитывая, что  $R'_k(t) = -S_k^{-1}(t)S'_k(t)S_k^{-1}(t)$ , получим линейную систему

$$R'_k(t) - M_k R_k(t) - R_k(t) M_k + \tilde{M} = 0, \quad R_k(t) = \begin{pmatrix} x_k(t) & y_k(t) \\ y_k(t) & z_k(t) \end{pmatrix}.$$

Решая ее и производя обратное преобразование с учетом условий (13), получим следующие явные выражения для  $\alpha_k(t), \beta_k(t)$  и  $\gamma_k(t)$ :

$$\alpha_k(t) = \frac{z_k(t)}{\Delta_k(t)}, \quad \beta_k(t) = -\frac{y_k(t)}{\Delta_k(t)}, \quad \gamma_k(t) = \frac{x_k(t)}{\Delta_k(t)} ;$$

$$z_k(t) = \left( \frac{\lambda_k^2}{a_0} - \frac{1}{a_1} \right) \sin^2 \lambda_k(T-t) + \frac{1}{4\beta_0 \lambda_k} \sin 2 \lambda_k(T-t) +$$

$$+ \frac{T-t}{2\beta_0} + a_1^{-1} > 0,$$

$$y_k(t) = \frac{1}{2\lambda_k} \left( \frac{\lambda_k^2}{a_0} - \frac{1}{a_1} \right) \sin 2 \lambda_k(T-t) - \frac{1}{2\beta_0 \lambda_k^2} \sin^2 \lambda_k(T-t),$$

$$x_k(t) = \frac{T-t}{2\beta_0 \lambda_k^2} - \frac{1}{\lambda_k^2} \left( \frac{\lambda_k^2}{a_0} - \frac{1}{a_1} \right) \sin^2 \lambda_k(T-t) -$$

$$- \frac{1}{4\beta_0 \lambda_k^3} \sin 2 \lambda_k(T-t) + a_0^{-1} > 0,$$

$$\Delta_k(t) \equiv x_k(t)z_k(t) - y_k^2(t) = \frac{1}{4\beta_0 \lambda_k^3} \left( \frac{\lambda_k^2}{a_0} - \frac{1}{a_1} \right) \sin 2 \lambda_k(T-t) +$$

$$+ \lambda_k^{-2} \left( \frac{\lambda_k^2}{a_0} + \frac{T-t}{2\beta_0} \right) \left( \frac{T-t}{2\beta_0} + \frac{1}{a_0} \right) - \frac{1}{4\beta_0 \lambda_k^4} \sin^2 \lambda_k(T-t) > 0,$$

$$a_k(t)\gamma_k(t) - \beta_k^2(t) \equiv 1 > 0, \quad k = 1, 2, \dots$$

Изложенным выше методом явное решение системы уравнений Риккати можно построить и в том случае, когда  $q \neq 0, \alpha_1 \neq 0, \alpha_2 \neq 0$ .

**Заключение.** Задача (1)–(3) может быть обобщена, в частности, можно рассматривать более общие критерии оптимальности. Также можно рассматривать несамосопряженные граничные задачи для описания смещений частей круговой арки при различных закреплениях ее концов. Предлагаемые здесь методы решения задачи оптимального конструирования можно применять и в этих задачах. Результаты, полученные в настоящей работе, рекомендуется использовать в технических задачах, в которых ищется оптимальная конструкция круговой арки.

### Список цитированных источников

1. Балакришнан, А. В. Прикладной функциональный анализ / А. В. Балакришнан // М.: Наука, 1980. – 384 с.
2. Бутковский, А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский // М.: Наука, 1975. – 568 с.
3. Егоров, А. И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами / А. И. Егоров // М.: Наука, 1978. – 464 с.
4. Егоров, А. И. Основы теории управления / А. И. Егоров // М. Физматлит, 2004. – 502 с.
5. Егоров, А. И. Уравнения Риккати / А. И. Егоров // М. Физматлит, 2001. – 319 с.
6. Лионс, Ж.-Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными / Ж.-Л. Лионс // М.: Мир, 1972. – 414 с.

7. Лурье, К. А. Оптимальное управление в задачах математической физики / К. А. Лурье // М.: Наука, 1975. – 480 с.
8. Плотников, В. И. Теория оптимизации управляемых систем с распределенными параметрами / В. И. Плотников // Докт. дисс., Горький, 1974.
9. Рахимов М., Оптимальное моделирование процессов теплопередачи и колебаний. Методы динамического программирования и спектрального разложения, научная монография, LAMBERT Academic Publishing, ISBN: 978-620-3-30910-2, International Book Market Service, 2021. – 346 pg.
10. Сиразетдинов, Т. К. Оптимизация систем с распределенными параметрами / Т. К. Сиразетдинов // М.: Наука, 1977. – 480 с.
11. Троицкий, В. А., Петухов, Л. В. Оптимизация формы упругих тел / В. А. Троицкий, Л. В. Петухов // М.: Наука, 1982. – 432 с.
12. Афанасьев, В. Н. Колмановский, В. Б. Носов, В. Р. Математическая теория конструирования систем управления. / В. Н. Афанасьев, В. Б. Колмановский, В. Р. Носов. Москва : «Высшая школа», 1989.–447 с.
13. Wang, P. K., Control of distributed parameter systems, в книге «Advance in control systems theory and applications» ed. by C. F. Leondes, 1. Acad. Press, NewYork – London, 1964. – С. 75-172.
14. Коллатц, Л. Задачи на собственные значения, / Л. Коллатц // «Наука», главная редакция физико-математической литературы, Москва : 1968. – 504 с.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ

*В. Г. Новосельцев<sup>1</sup>, Ю. В. Каперейко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, БрГТУ, Брест, Беларусь, [vgnovoseltsev@yandex.ru](mailto:vgnovoseltsev@yandex.ru)

<sup>2</sup>Преподаватель-стажер, БрГТУ, Брест, Беларусь, [yulya.kapereyko@mail.ru](mailto:yulya.kapereyko@mail.ru)

### Аннотация

В данной статье представлены результаты по исследованию различных вариантов установки расширительного бака в системе отопления здания, присоединенной к централизованным тепловым сетям с помощью независимой схемы подключения. Сделаны выводы по наиболее удачному расположению бака в замкнутом контуре системы отопления.

**Ключевые слова:** потери давления, теплоноситель, система водяного отопления, циркуляционный контур, расширительный бак, перепад давления, радиатор.

## ENSURE OPTIMAL OPERATION OF WATER HEATING SYSTEMS

*V. Novoseltsev, Y. Kapereyko*

### Abstract

This article presents the results of a study of various options for installing an expansion tank in a building heating system connected to centralized heating networks using an independent connection diagram. Conclusions are drawn on the most successful location of the tank in a closed circuit of the heating system.

**Keywords:** pressure loss, coolant, water heating system, circulation circuit, expansion tank, pressure difference, radiator.

**Введение.** Современные системы отопления в большинстве своем проектируют и строят с независимым подключением к централизованной тепловой сети. Такие системы являются более надежными, удобными в эксплуатации, экономичными. В случае особенностей системы отопления в здании такое подключение позволяет также использовать теплоноситель, отличный от теплоносителя в централизованной тепловой сети. Такая схема подключения широко используется для подключения к системе отопления многоэтажных зданий или построек, которые требуют повышенного уровня надежности работы отопительного механизма.

Теплоноситель из источника тепловой энергии (котельная, ТЭЦ) поступает в городскую тепловую сеть, а затем распределяется по тепловым пунктам. Они бывают: индивидуальные (обслуживающие одно здание (или его часть) и располагаемые обычно в его подвале) и центральные (обслуживающие сеть или группу зданий и размещаемые, как правило, в отдельных сооружениях).

В настоящее время чаще всего проектируются индивидуальные тепловые пункты (ИТП).

Индивидуальный тепловой пункт — комплекс устройств, состоящий из элементов, обеспечивающих присоединение системы отопления и горячего водоснабжения к централизованной тепловой сети. Основными элементами ИТП являются: теплообменники, насосы, клапаны, датчики, контроллеры, различные блоки управления и запорно-регулирующая арматура.

Вода из наружной тепловой сети проходит через теплообменник и передает теплоту воде, идущей из отопительного контура здания. Таким образом обеспечивается несмешивание сред двух отопительных контуров, что, в свою очередь, является существенным преимуществом, так как качество воды в городской тепловой сети может быть неподходящим для благоприятной работы регулирующей арматуры в ИТП, а также для работы отопительных приборов в помещениях (например, биметаллические отопительные приборы требуют повышенного качества теплоносителя, так как они более подвержены коррозии и скоплению водорода в верхних отделах).

При падении температуры наружного воздуха датчик посылает сигнал на контроллер, который регулирует положение клапана (двух- или трехходового), расположенного на подающем теплопроводе со стороны городской сети. Расход воды увеличивается, следовательно, теплопередача через теплообменник тоже увеличивается, повышая температуру теплоносителя отопительного контура здания.

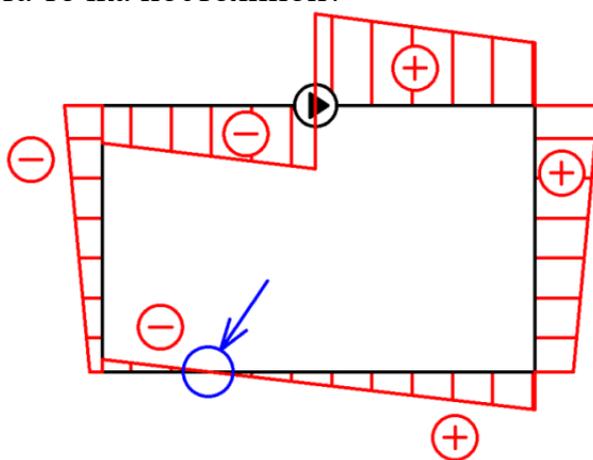
При увеличении температуры наружного воздуха контроллер, наоборот, начинает прикрывать регулирующей клапан, чтобы снизить расход воды через теплообменник со стороны греющей части, а значит снижается температура теплоносителя в системе отопления здания. Контроль за колебаниями температуры осуществляют 3 датчика (погодозависимая автоматика): датчик температуры наружного воздуха, датчик температуры обратного трубопровода со стороны городской сети (для обеспечения эффективного съема теплоты), датчик температуры подающего трубопровода со стороны отопительной системы здания. В ИТП осуществляется контроль перепада давления на фильтре (для своевременного обслуживания фильтрующего материала) и на циркуляционном насосе (исключение «сухого хода» (реле перепада давления) и контроля за работой насоса (реле давления)).

Как известно, при нагревании тела имеют свойство расширяться. Вода внутри замкнутого отопительного контура то уменьшается, то увеличивается в объеме. Это происходит во время регуляции температуры и расхода теплоносителя в системе отопления здания. А так как вода является практически несжимаемой средой (коэффициент сжатия воды равен  $5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/Па}$ ), то давление в системе начинает так же быстро увеличиваться или уменьшаться. Избыточное давление может неблагоприятно влиять на все элементы системы отопления. Поэтому, чтобы обезопасить систему от выхода из строя ее составляющих, одним из элементов замкнутого отопительного контура является расширительный бак. Однако не все знают, как проходит выбор и установка расширительного бака. Ведь даже при

подключении такой простой детали есть свои нюансы. Обычно подбор расширительного бака происходит «наугад», а его установка зависит от расположения теплового пункта и наличия свободного пространства для него.

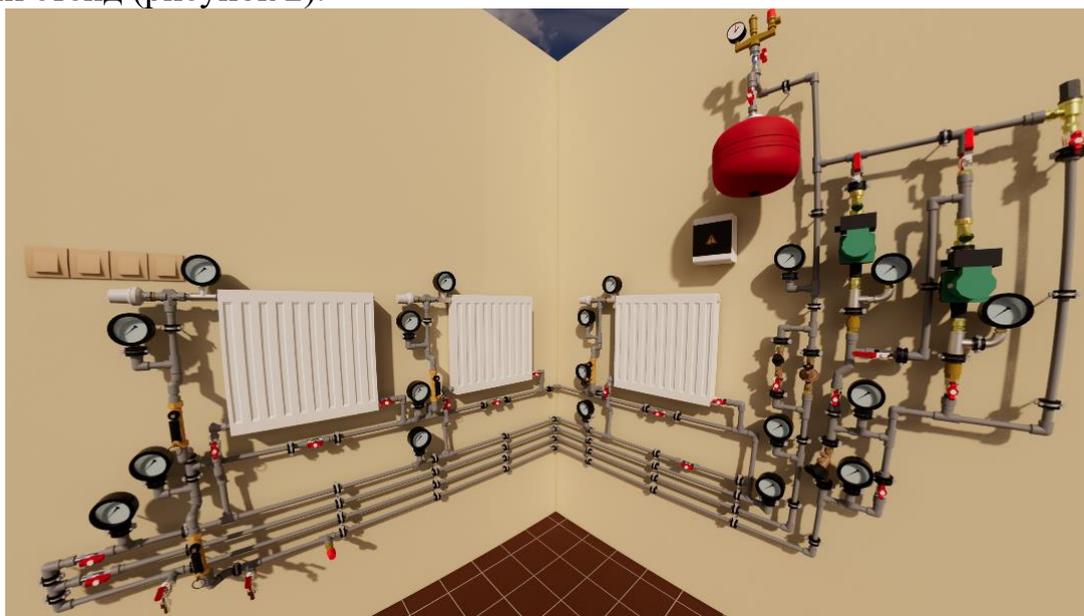
**Материалы и методы.** Методологическая основа исследования состояла из сбора данных, Исследование проводилось посредством расчетов и с помощью экспериментального лабораторного стенда.

**Результаты и обсуждение.** В каждом циркуляционном кольце системы существует только одна точка постоянного давления, так называемая «нейтральная» точка системы отопления, в которой зона нагнетания сменяется зоной всасывания [1] (рисунок 1). Эта точка является наиболее благоприятной для установки в ней расширительного бака, так как статическое и динамическое давление в ней равны и резервуар не подвержен «нагнетанию» или «подсасыванию» воды. Однако является ли эта точка постоянной?



**Рисунок 1** – Месторасположение точки нулевых давлений.

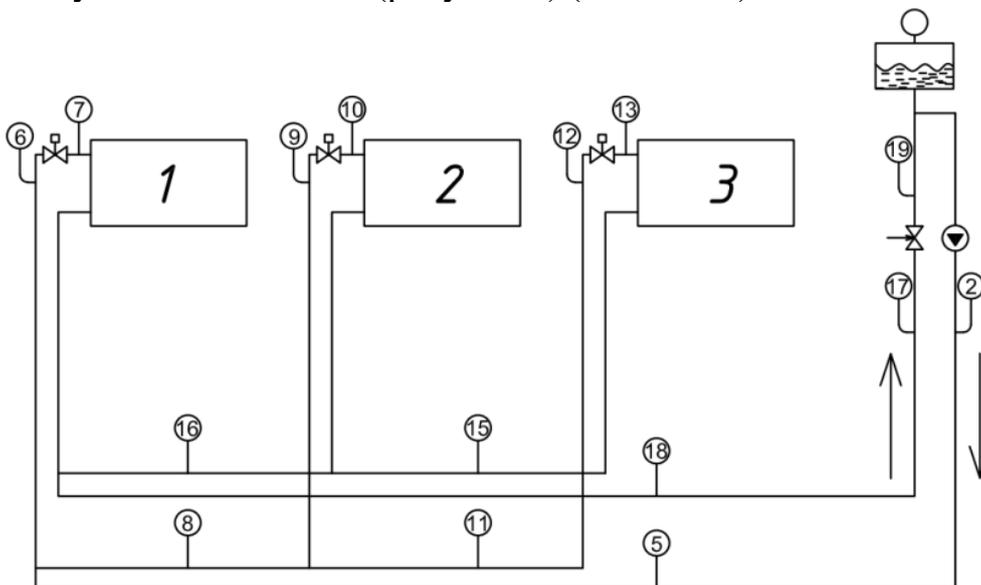
Для исследования месторасположения этой точки был использован лабораторный стенд (рисунок 2).



**Рисунок 2** – 3D модель лабораторного стенда, разработанная в программе Revit.

Попеременно изменяя сопротивление и размер контура путем включения в систему отопления дополнительных отопительных приборов, фиксировались значения манометров до и после включения насоса. По изменению давления на каждом из манометров можно судить о наличии зоны всасывания либо нагнетания насоса.

1. В работу включен 1 насос (рисунок 3) (таблица 1).

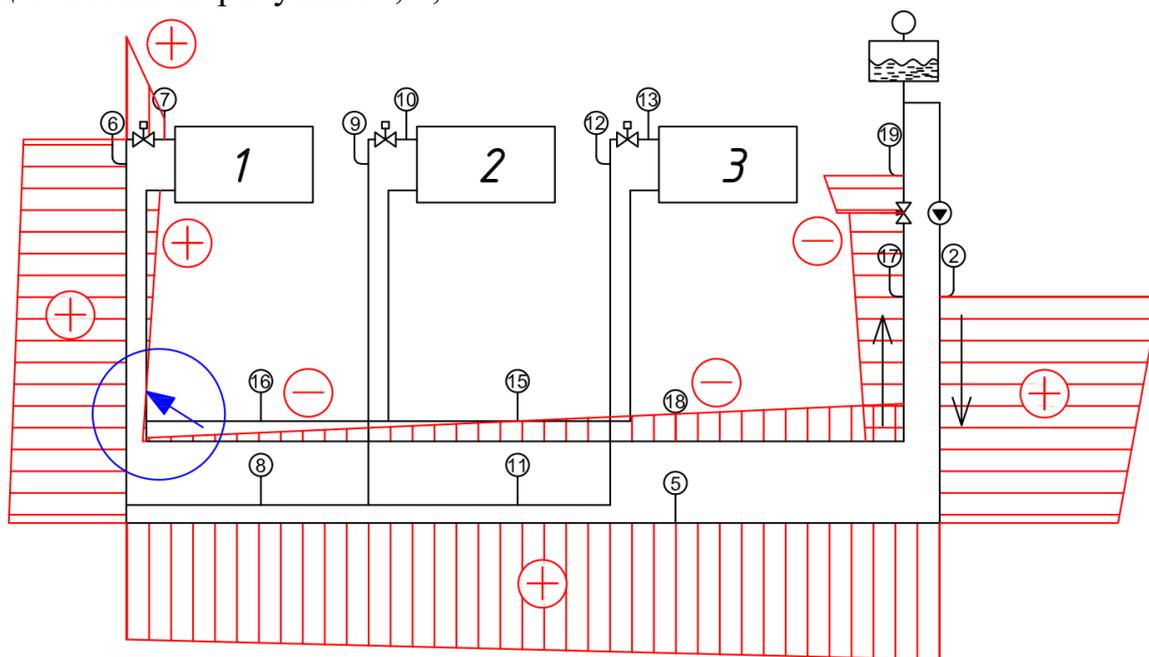


**Рисунок 3** – Схема системы отопления с одним насосом

**Таблица 1** – Показания манометров в системе с одним насосом

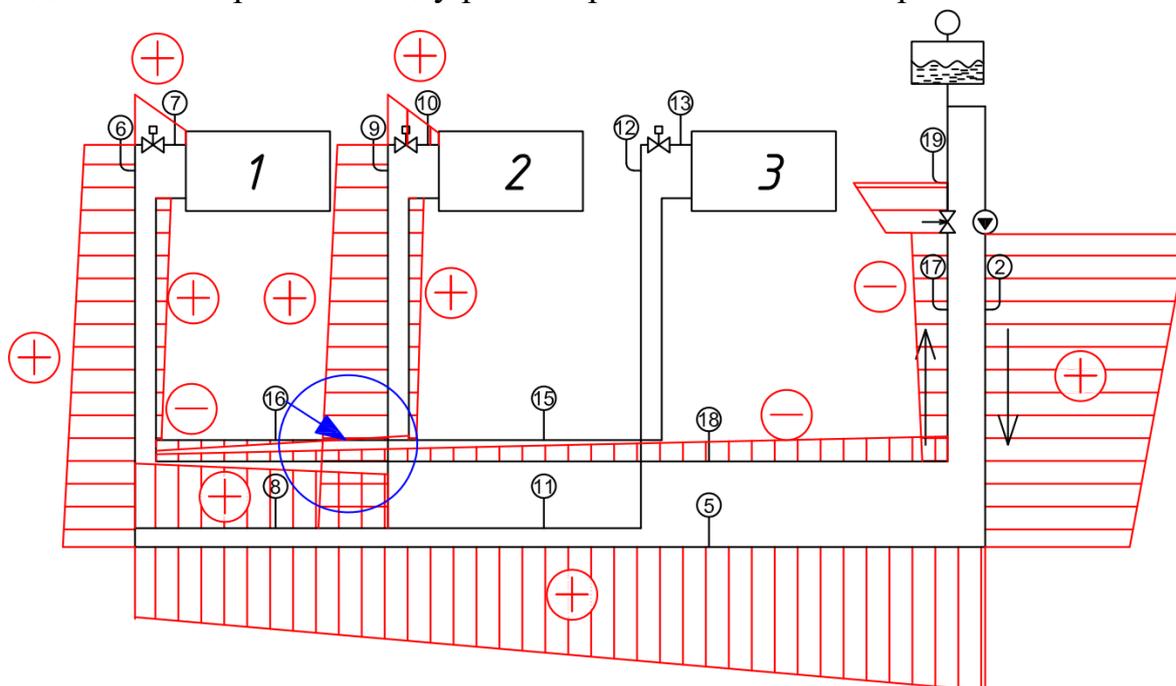
№ манометра	Р до включения, МПа	с 1 радиатором	хР, МПа	с 2 радиаторами	хР, МПа	с 3 радиаторами	хР, МПа
		Р после включения, МПа		Р после включения, МПа		Р после включения, МПа	
2	0,074	0,1058	0,0318	0,102	0,028	0,101	0,027
5	0,079	0,098	0,019	0,089	0,01	0,087	0,008
6	0,077	0,092	0,015	0,084	0,007	0,083	0,006
7	0,072	0,075	0,003	0,074	0,002	0,075	0,003
8	0,079			0,088	0,009	0,086	0,007
9	0,075			0,082	0,007	0,08	0,005
10	0,073			0,074	0,001	0,075	0,002
11	0,078					0,0837	0,0057
12	0,073					0,0773	0,0043
13	0,072					0,0756	0,0036
15	0,08					0,0805	0,0005
16	0,08			0,079	-0,001	0,0805	0,0005
17	0,078	0,071	-0,007	0,073	-0,005	0,074	-0,004
18	0,08	0,076	-0,004	0,079	-0,001	0,08	0
19	0,071	0,0595	-0,0115	0,058	-0,013	0,059	-0,012

Эпюры перепада давления для системы с одним, двумя и тремя радиаторами представлены на рисунках 4, 5, 6.



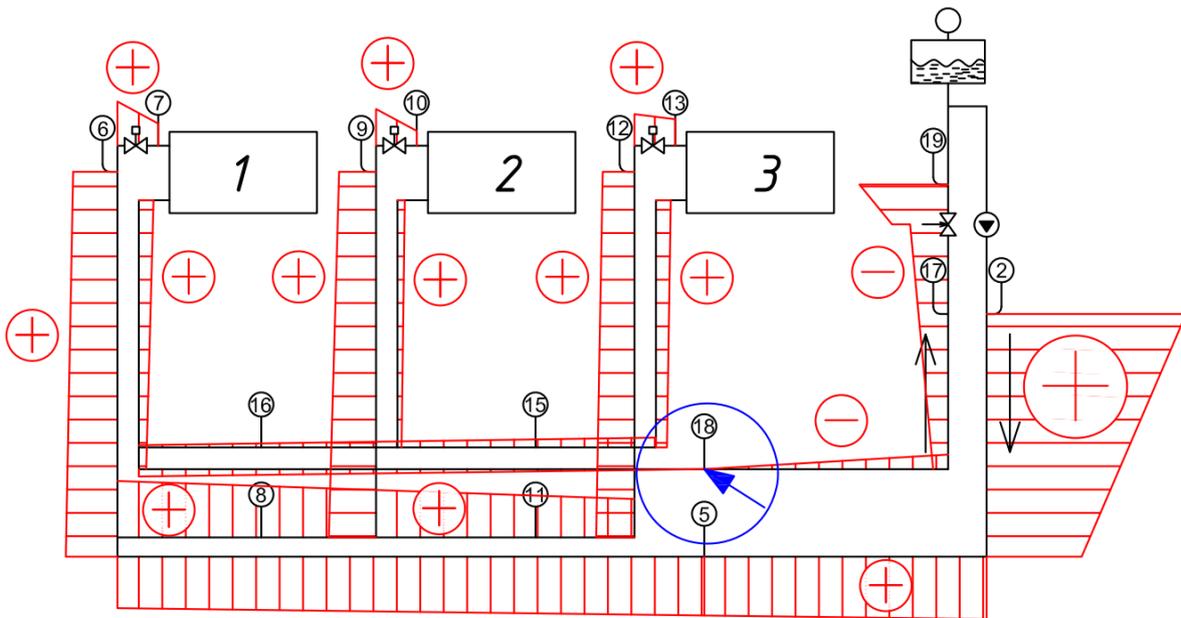
**Рисунок 4** – Схема системы отопления с одним насосом и одним радиатором

При включении в систему только одного радиатора точка нулевых давлений находится на «обратке» между радиатором № 1 и манометром № 18.



**Рисунок 5** – Схема системы отопления с одним насосом и двумя радиаторами

При включении в систему двух радиаторов точка нулевых давлений располагается на «обратке» между радиатором № 2 и манометром № 16.

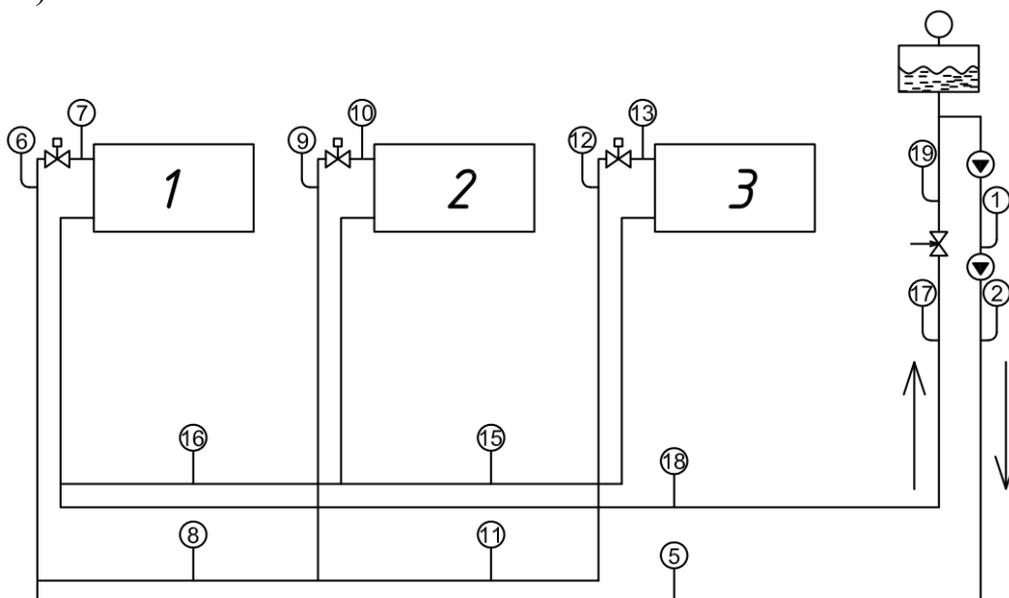


**Рисунок 6** – Схема системы отопления с одним насосом и тремя радиаторами

При включении в систему трех радиаторов точка нулевых давлений находится на «обратке», в месте расположения манометра № 18.

Вывод: при добавлении в систему отопления дополнительных сопротивлений точка нулевых давлений смещается ближе к всасывающему патрубку насоса.

2. В работу включены 2 насоса, т. е. напор увеличился в 2 раза (рисунок 7) (таблица 2).

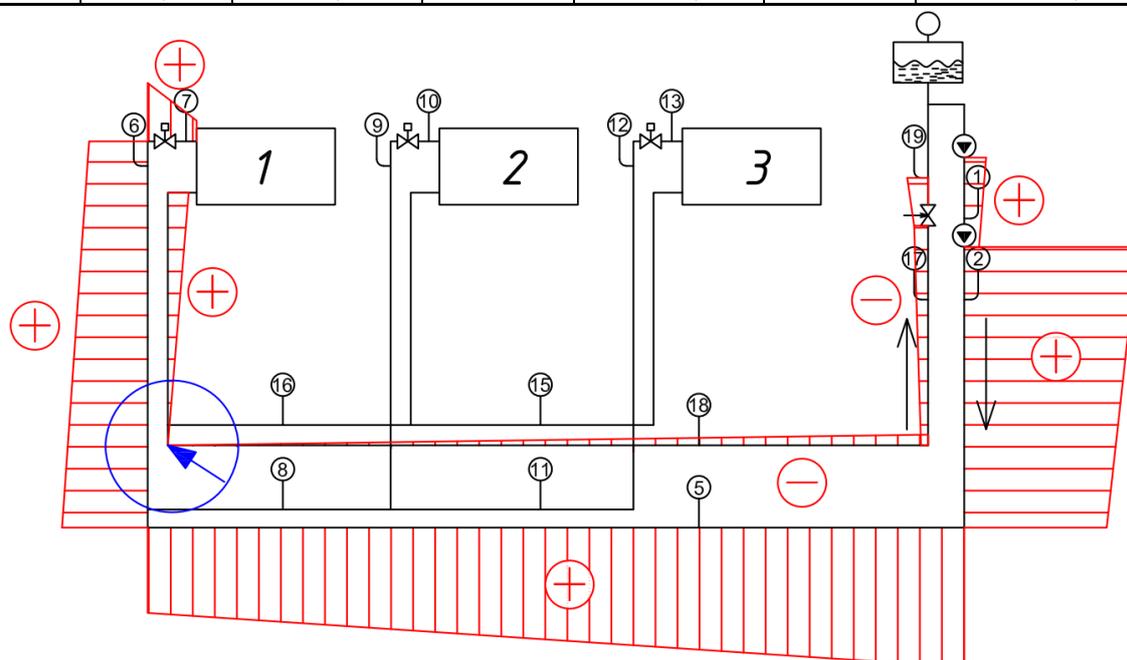


**Рисунок 7** – Схема системы отопления с двумя насосами

Эпюры перепада давления для системы с одним, двумя и тремя радиаторами представлены на рисунках 8, 9, 10.

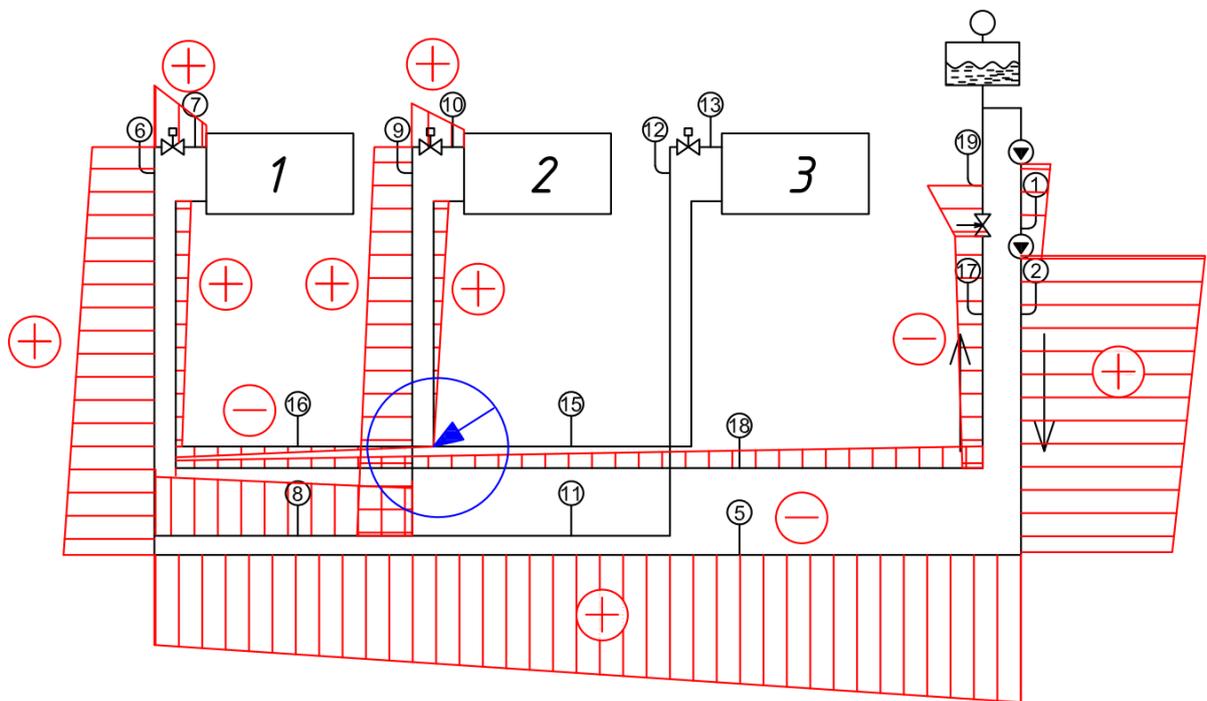
**Таблица 2** – Показания манометров в системе с двумя насосами

№ ма- но- метра	Р до включе- ния, МПа	с 1 радиа- тором	хР, МПа	с 2 радиа- торами	хР, МПа	с 3 радиа- торами	хР, МПа
		Р после включения, МПа		Р после включения, МПа		Р после вклю- чения, МПа	
1	0,071	0,08	0,009	0,077	0,006	0,076	0,005
2	0,072	0,125	0,053	0,119	0,047	0,117	0,045
5	0,079	0,113	0,034	0,0975	0,0185	0,092	0,013
6	0,076	0,1045	0,0285	0,092	0,016	0,087	0,011
7	0,0715	0,076	0,0045	0,077	0,0055	0,076	0,0045
8	0,078			0,097	0,019	0,09	0,012
9	0,074			0,088	0,014	0,083	0,009
10	0,072			0,076	0,004	0,076	0,004
11	0,0765					0,088	0,0115
12	0,0725					0,082	0,0095
13	0,0705					0,0765	0,006
15	0,079					0,081	0,002
16	0,079			0,0785	-0,0005	0,08	0,001
17	0,0775	0,065	-0,0125	0,068	-0,0095	0,069	-0,0085
18	0,08	0,08	0	0,078	-0,002	0,08	0
19	0,071	0,0505	-0,0205	0,048	-0,023	0,047	-0,024



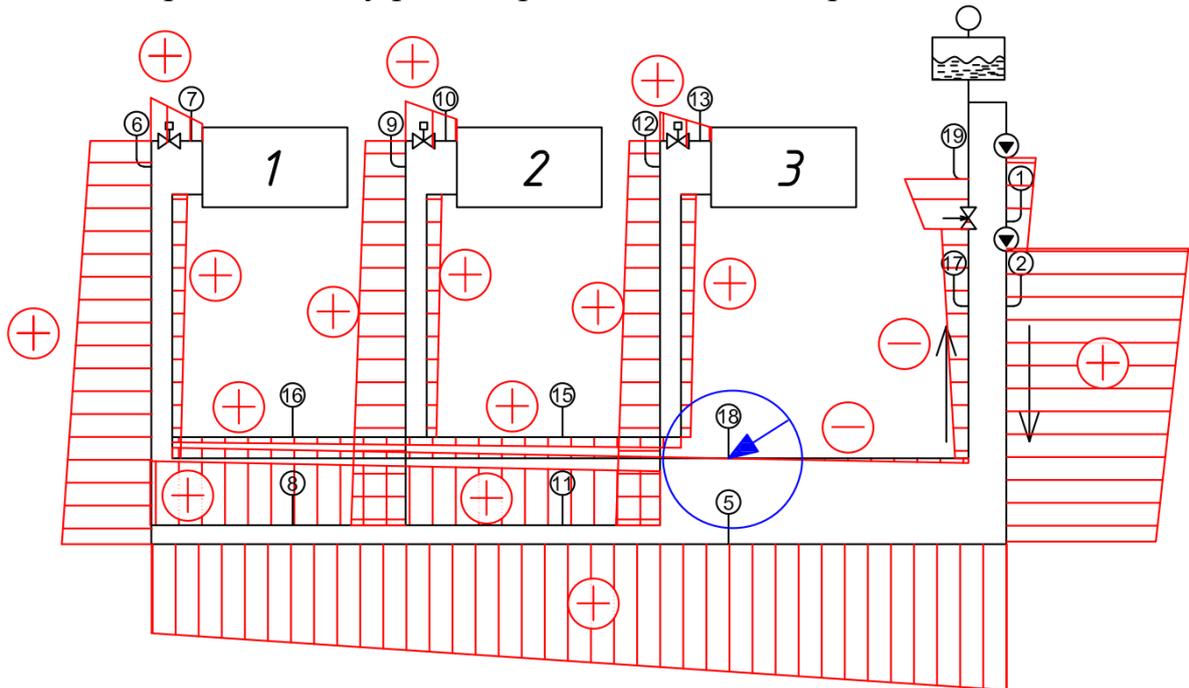
**Рисунок 8** – Схема системы отопления с двумя насосами и одним радиатором.

При включении в систему только одного радиатора точка нулевых давлений находится на «обратке» между радиатором № 1 и манометром № 18.



**Рисунок 9** – Схема системы отопления с двумя насосами и двумя радиаторами

При включении в систему двух радиаторов точка нулевых давлений располагается на «обратке» между радиатором № 2 и манометром № 16.



**Рисунок 10** – Схема системы отопления с двумя насосами и тремя радиаторами

При включении в систему трех радиаторов точка нулевых давлений находится на «обратке», в месте расположения манометра № 18.

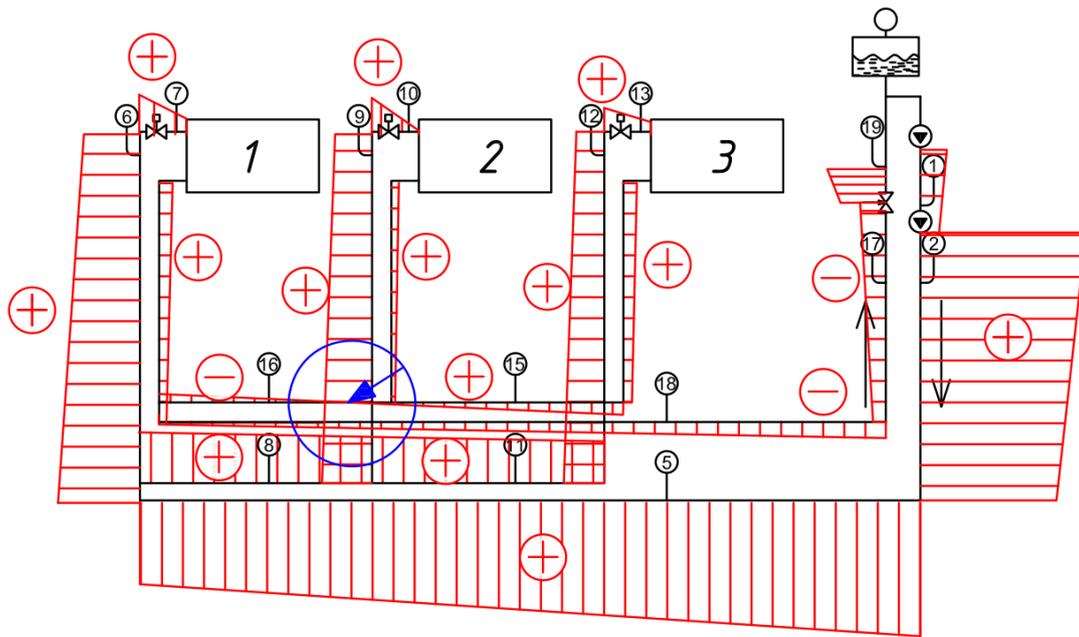
Вывод: при добавлении в систему сопротивлений даже с увеличением напора точка нулевых давлений оставалась в аналогичных местах, как и при меньшем напоре. То есть напор насоса в рассматриваемом случае не повлиял на месторасположение точки нулевых давлений.

В процессе работы системы отопления термостатические клапаны начинают прикрываться. Рассмотрим вариант, где термостатический клапан на радиаторе № 2 прикрылся на 50 % (рисунок 11) и на 100 % (рисунок 12). Показания манометров приведены в таблице 3.

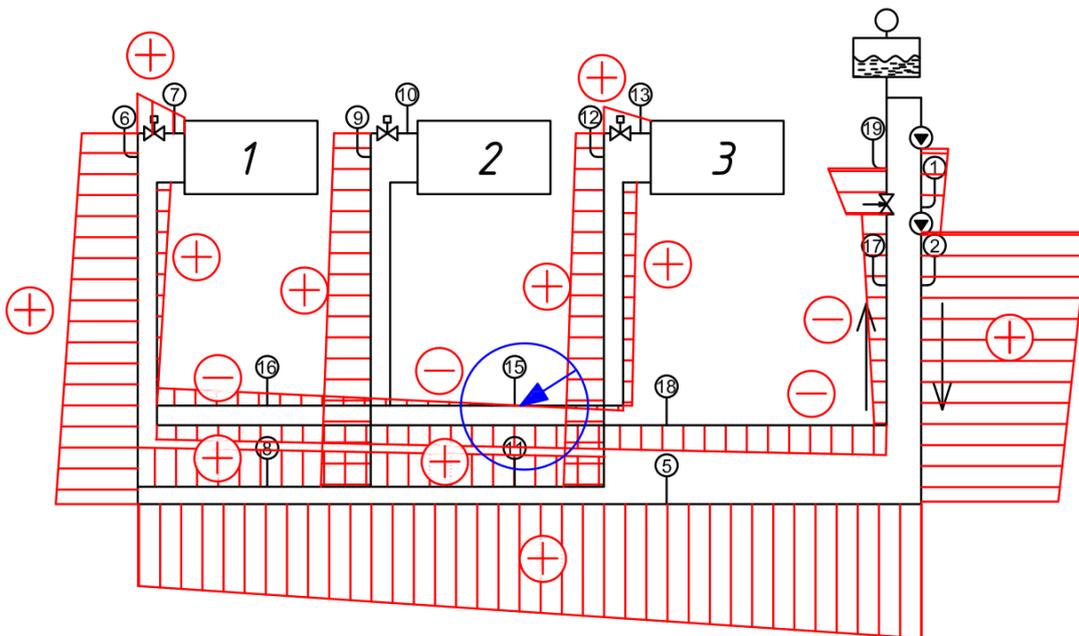
**Таблица 3** – Показания манометров в системе с двумя насосами и прикрытым ТК

№ манометра	Р до включения, МПа	Изменение пропускной способности ТК на радиаторе №2			
		Р при открытии 50 % сечения ТК, МПа	хР, МПа	полностью закрыт, МПа	хР, МПа
1	0,071	0,08	0,0055	0,08	0,007
2	0,072	0,118	0,046	0,12	0,048
5	0,079	0,0935	0,0145	0,0985	0,0195
6	0,076	0,09	0,014	0,093	0,017
7	0,0715	0,0765	0,005	0,0765	0,005
8	0,078	0,093	0,015	0,097	0,019
9	0,074	0,088	0,014	0,0925	0,0185
10	0,072	0,073	0,001	0,071	-0,001
11	0,0765	0,0915	0,015	0,095	0,0185
12	0,0725	0,086	0,0135	0,089	0,0165
13	0,0705	0,076	0,0055	0,076	0,0055
15	0,079	0,08	0,001	0,0785	-0,0005
16	0,079	0,078	-0,001	0,077	-0,002
17	0,0775	0,068	-0,0095	0,068	-0,0095
18	0,08	0,0785	-0,0015	0,0775	-0,0025
19	0,071	0,047	-0,024	0,0475	-0,0235

Вывод: сравнивая эпюры изменения давлений с полностью открытым термостатическим клапаном (рисунок 10), наполовину открытым (рисунок 11) и полностью закрытым (рисунок 12) можно сделать вывод, что при закрытии термостатического клапана точка удаляется от всасывающего патрубка. Однако при полном закрытии ТК точка возвращается приблизительно на то же самое место, где она располагалась при включении в систему только двух радиаторов (так как термостатический клапан закрыт, то движение воды через этот радиатор отсутствует) (рисунок 9).

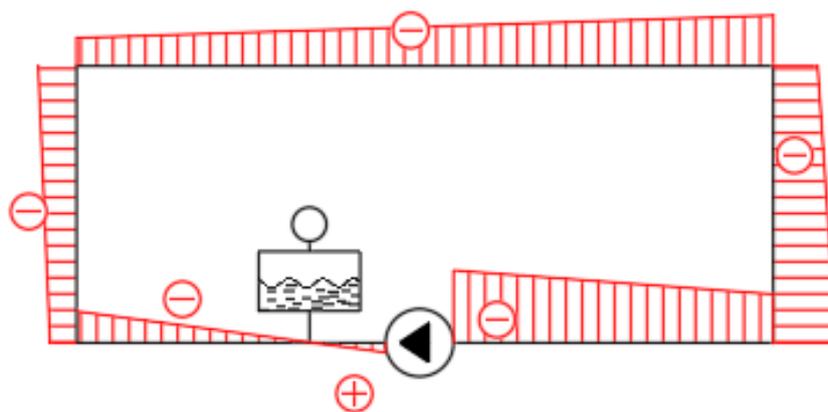


**Рисунок 11** – Схема системы отопления с двумя насосами и тремя радиаторами (клапан на радиаторе № 2 прикрит на 50 %)



**Рисунок 12** – Схема системы отопления с двумя насосами и тремя радиаторами (клапан на радиаторе № 2 прикрит на 100 %)

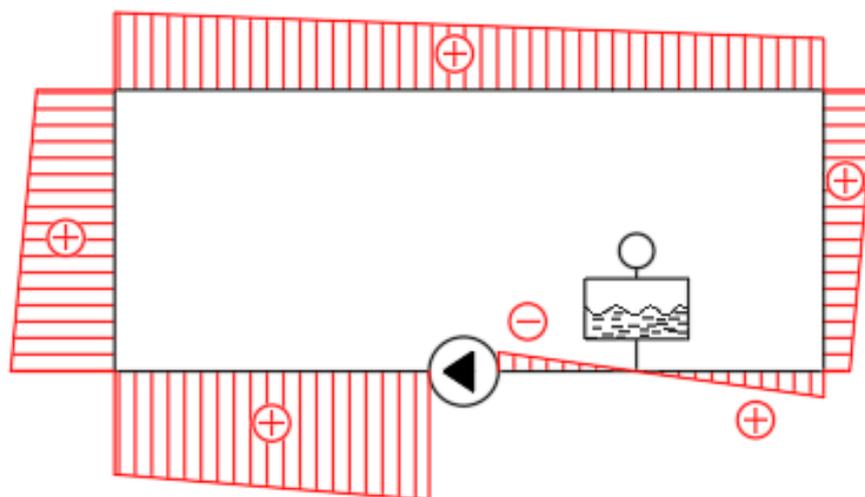
На основании вышеперечисленных выводов можно сказать, что расположение точки нулевых давлений в современных системах отопления с термостатическими клапанами на отопительных приборах не является постоянным, однако можно определить участок, на котором приблизительно находится эта точка. Таким образом, благоприятное расположение расширительного бака в системе отопления также не является постоянным. Рассмотрим 2 варианта установки расширительного бака.



**Рисунок 13** – Схема системы с расширительным баком на нагнетающем патрубке

В случае, изображенном на рисунке 13, расширительный бак установлен на нагнетающей части. До расширительного бака расположена зона нагнетания, а остальная часть системы находится под разряжением, т. е. динамическое давление меньше статического, что может привести к подосу воздуха в местах установки автоматических воздухоотводчиков, где давление системы становится меньше атмосферного. Это происходит из-за недостаточного избыточного давления в системе, т. е. статическое давление жидкости внутри контура слишком мало для нормальной работы насоса. Вследствие этого циркуляция в системе может прекратиться.

С целью устранения данной проблемы расширительный бак устанавливают на всасывающей стороне насоса (рисунок 14). Это позволяет почти всей системе находиться под напором, где динамическое давление больше статического, что позволяет избежать падения давления в контуре ниже атмосферного и обеспечить циркуляцию теплоносителя.



**Рисунок 14** – Схема системы с расширительным баком на всасывающем патрубке

Таким образом, лучше всего расширительный бак располагать на всасывающей стороне по отношению к насосу.

**Заключение.** Так как в последние годы в Беларуси преимущественно строятся здания с системой отопления, присоединенной к тепловым сетям через индивидуальный тепловой пункт (ИТП) по независимой схеме, то установка расширительного бака является важным аспектом для оптимальной работы системы отопления здания.

В процессе работы выяснили, что нейтральная точка системы отопления находится ближе к всасывающему патрубку циркуляционного насоса. Таким образом, наиболее удобным расположением расширительного бака в системе отопления будет являться установка его перед насосом.

#### **Список цитированных источников**

1. Сканави, А. Н. Отопление: Учебник для вузов / А. Н. Сканави, Л. М. Махов. – М. : Издательство АСВ, 2008. – 576 с.
2. Сайт ГК «ТЕПЛОСИЛА» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.teplosila.com](http://www.teplosila.com). – Дата доступа: 12.04.2022.
3. Покотиллов, В. В. Системы водяного отопления /В. В. Покотиллов – Вена : 2008. – 159 с.
4. Логунова, О. Я. Водяное отопление. / О. Я. Логунова, И. В.Зоря – Изд-во “Лань” – 2019. – 274 с.
5. Покотиллов, В. В. Регулирующие клапаны автоматизированных систем тепло- и холодоснабжения. /В. В. Покотиллов – Вена : 2017. – 228 с.
6. Варфоломеев, Ю. М. Отопление и тепловые сети: учебник / Ю. М. Варфоломеев, О. Я. Кокорин. – М. : ИНФРА-М, 2008. – 480 с.
7. Хрусталёв, Б. М. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование: учебное пособие / Б. М. Хрусталёв. – М. : Издательство АСВ, 2007. – 784 с.

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОРИТЕТОВ ТЕРМОСТАТИЧЕСКИХ КЛАПАНОВ В СИСТЕМЕ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ, НЕ СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ПРОЕКТУ**

*В. Г. Новосельцев<sup>1</sup>, Д. В. Новосельцева<sup>2</sup>, В. В. Лукаша<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, vgnovoseltsev@yandex.ru

<sup>2</sup>доцент кафедры природообустройства, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, dvnovoseltseva@yandex.ru

<sup>3</sup>доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, vvluksha@gmail.com

### **Аннотация**

При проектировании систем водяного отопления необходимо избежать необоснованного использования лишнего оборудования, превышения диаметров сверх необходимых значений и т. д. В реальности встречаются отклонения от проекта при монтаже, которые приводят к необходимости пересмотра параметров работоспособности системы. Одним из случаев является замена трубопроводов одного диаметра на другой.

В статье рассмотрен конкретный случай для системы водяного отопления жилого дома с частично измененными диаметрами поквартирных трубопроводов.

Расчеты показали, что установленного насоса достаточно для работы системы отопления с фактическими диаметрами трубопроводов. Однако уменьшение диаметров трубопроводов привело к увеличению гидравлических сопротивлений и, как следствие, уменьшению авторитетов термостатических клапанов. Следствием уменьшения авторитетов является снижение эффективности регулирования системой отопления, то есть снижаются возможности по экономии тепловой энергии.

**Ключевые слова:** система водяного отопления, термостатический клапан, гидравлический расчет, пропускная способность, циркуляционный насос, авторитет клапана.

## **ENSURING THE AUTHORITY OF THERMOSTATIC VALVES IN THE SYSTEM WATER HEATING THAT DOES NOT CORRESPOND TO THE PROJECT**

*Uladzimir Navaseltsau<sup>1</sup>, Dzina Navaseltsava<sup>2</sup>, Uladzimir Luksha<sup>3</sup>*

### **Abstract**

When designing water heating systems, it is necessary to avoid unjustified use of excess equipment, exceeding diameters beyond the required values, etc. In reality, there are deviations from the project during installation, which lead to the need to revise

the parameters of the system's operability. One of the cases is the replacement of pipelines of one diameter with another.

The article considers a specific case for a water heating system of a residential building with partially changed diameters of apartment-by-apartment pipelines.

Calculations have shown that the installed pump is sufficient to operate the heating system with the actual diameters of the pipelines. However, the decrease in pipeline diameters led to an increase in hydraulic resistances and, as a consequence, a decrease in the authority of thermostatic valves. The consequence of a decrease in authority is a decrease in the efficiency of regulation by the heating system, that is, the possibilities for saving thermal energy are reduced.

**Keywords:** water heating system, thermostatic valve, hydraulic calculation, throughput, circulation pump, valve authority.

### **Введение**

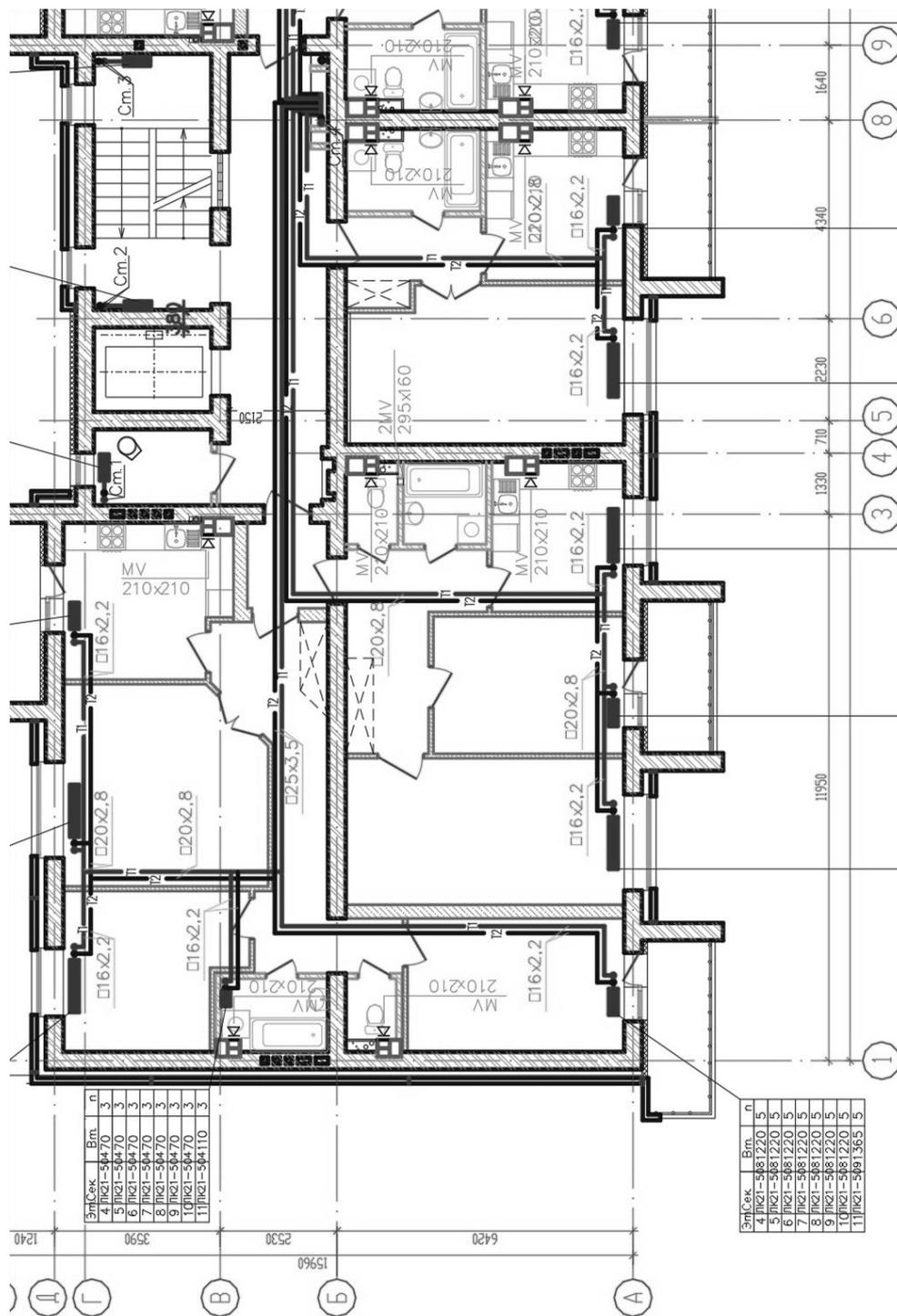
Цель систем отопления – создание теплового комфорта в помещениях при минимуме потребления энергоресурсов. При проектировании систем водяного отопления необходимо избежать необоснованного использования ненужного оборудования, превышения диаметров сверх необходимых значений и т. д.

В разных работах рассматриваются вопросы обоснования применения различных видов оборудования для обеспечения оптимальной работы и энергоэффективности систем отопления. [1–3].

В реальности встречаются отклонения от проекта при монтаже, которые приводят к необходимости пересмотра параметров работоспособности системы. Одним из случаев является замена трубопроводов одного диаметра на другой. Рассмотрение перспектив работы такой системы отопления на примере является целью данной работы.

**Объект исследования.** Для примера рассмотрена система водяного отопления в жилом 11-этажном доме в г.Бресте (Беларусь) 2019 года постройки. В соответствии с проектом предусмотрены следующие решения системы отопления. В доме запроектирована поквартирная двухтрубная горизонтальная система водяного отопления с установкой счетчиков учета теплоты для каждой квартиры.

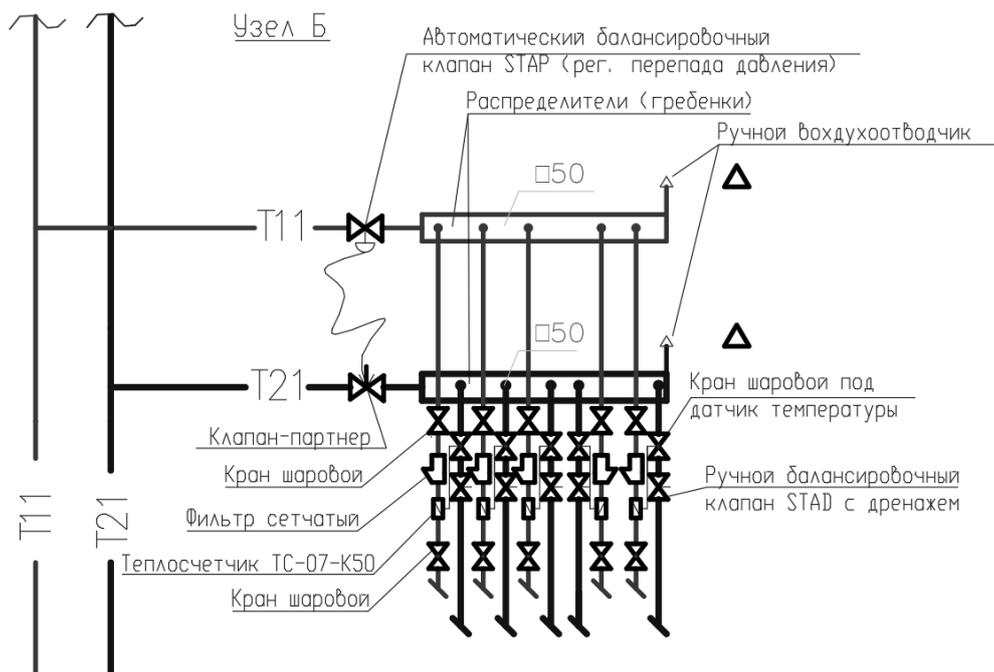
Схема системы поквартирного отопления представляет собой пару подающих и обратных вертикальных стояков (для каждой из двух секций здания), к которым поэтажно подключаются циркуляционные кольца отдельных квартир. Системы отопления квартир присоединяются через распределительные коллекторы, расположенные на каждом этаже в распределительных шкафах.



**Рисунок 1** – План 11 этажа в осях 1–12 с элементами системы отопления

Система теплоснабжения распределительных коллекторов выполняется из стальных труб, система отопления от распределительных коллекторов – из полиэтиленовых труб с антидиффузионной защитой, проложенных скрыто в конструкции пола в защитной гофрированной трубе типа «пешель». На вводе каждого из распределителей установлен автоматический регулятор перепада давления в паре с клапаном-партнером для подсоединения капиллярной трубки. От распределителя на ответвлениях к каждой квартире устанавливается ручной балансировочный клапан, фильтр, теплосчетчик ультразвуковой и запорная арматура. В качестве нагревательных приборов применены стальные панельные радиаторы марки

«Лидея компакт». Для регулирования теплоотдачи отопительных приборов используются термостатические клапаны с предварительной настройкой. На обратной подводке к радиаторам установлены запорно-регулирующие клапаны.



**Рисунок 2** – Узел подключения поквартирных систем отопления для одной из секций

В качестве нагревательных приборов применены стальные панельные радиаторы марки «Лидея компакт». Для регулирования теплоотдачи отопительных приборов используются термостатические клапаны с предварительной настройкой. На обратной подводке к радиаторам установлены запорно-регулирующие клапаны.

При монтаже системы отопления поквартирные ветви системы отопления были смонтированы полиэтиленовыми трубопроводами диаметром  $18 \times 2,5$  мм и  $14 \times 2$  мм вместо проектных  $25 \times 3,5$  мм и  $16 \times 2$  мм.

### Методика выполнения исследований

Для анализа перспектив функционирования запроектированной системы отопления выполнены расчеты гидравлических сопротивлений в системе при максимальных расходах теплоносителя, а также соотнесение их с параметрами установленного в индивидуальном тепловом пункте насосного оборудования.

Определяем расходы воды на участках по формуле

$$G = \frac{0,86 \cdot Q_{уч}}{(t_g - t_o)}, \text{ кг/ч}, \quad (1)$$

где  $Q_{уч}$  – тепловая нагрузка на расчетном участке, Вт;

$t_g$  – расчетная температура воды на входе в систему отопления (по проектным данным  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ );

$t_o$  – расчетная температура обратной воды на выходе из системы отопления (по проектным данным  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

По расходам воды на участках по таблицам для гидравлического расчета (данные производителей трубопроводов) определяем для принятых диаметров величину удельных потерь давления  $R_{уд}$ , Па/м и скорость движения воды  $V$ , м/с. Оптимальная расчетная скорость движения воды для полимерных трубопроводов должна определяться по рекомендациям изготовителей трубопроводов, в большинстве случаев скорость составляет до 0,5...0,7 м/с для полимерных труб, удельная потеря давления на трение  $R_{уд}$  в среднем 100...250 Па/м. Например, по рекомендациям известного производителя полимерных трубопроводов фирмы KAN-therm, за скорость в металлополимерных и полиэтиленовых трубопроводах, проходящих в конструкции пола, следует принимать значения, соответствующие экономичным гидравлическим сопротивлениям  $R_{уд} = 150 - 250$  Па/м:

Ø14 × 2	v = 0,3 ÷ 0,4 м/с
Ø16 × 2	v = 0,35 ÷ 0,45 м/с
Ø18 × 2,5	v = 0,4 ÷ 0,5 м/с
Ø20 × 2,8	v = 0,45 ÷ 0,6 м/с
Ø25 × 3,5	v = 0,5 ÷ 0,6 м/с.

Определяем потери давления на трение на участках. Потери давления на балансировочных клапанах определяем по номограммам изготовителя или при известном значении пропускной способности элемента  $k_v$  по формуле

$$\Delta P = 0,1 \cdot \left( \frac{G}{k_v} \right)^2 \text{ Па}, \quad (2)$$

где  $G$  – расход воды на участке, кг/ч;

$k_v$  – пропускная способность (по каталогу изготовителя), м<sup>3</sup>/ч.

Все  $k_v$  приняты по данным производителей оборудования, марки которого взяты из проектных данных.

В главное циркуляционное кольцо рассматриваемой системы отопления входят потери в термостатическом клапане, ультразвуковом теплосчетчике, ручном балансировочном клапане, автоматическом балансировочном клапане и клапане-партнере. Местные сопротивления, сопротивления отопительного прибора, сопротивления остальных элементов в поквартирном узле и запорно-регулирующего клапана у радиатора учитываем в виде 20 % добавки к основным сопротивлениям.

#### **Расчет для секции здания в осях 1–12.**

В качестве главного циркуляционного кольца принят отопительный прибор квартиры верхнего этажа с самой большей протяженностью трубопроводов – комната в осях А–Б, ось 1.

Расчетные тепловые потери комнаты – 1365 Вт, всех помещений квартиры – 5015 Вт. Настройка термостатического клапана рассматриваемого отопительного прибора – 5, марка клапана RA-N, диаметр

15 мм. Настройка ручного балансировочного клапана квартиры – 1.4, марка клапана STAD, диаметр 20 мм. Настройка клапана-партнера в поквартирном узле – 3, марка клапана STAD, диаметр 20 мм. Марка автоматического балансировочного клапана STAR, диаметр 20 мм. Марка теплосчетчика ТС-07 к50, диаметр 15 мм.

*Результаты расчетов:*

А. В соответствии с проектом

Сопротивление главного циркуляционного кольца:

1. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 16 мм, длина 19,4 м (подача и обратка), расход теплоносителя 59 кг/ч – удельные потери давления  $R_{уд} = 36$  Па/м, скорость движения воды – 0,15 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 0,84 кПа.

2. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 25 мм, длина 36 м (подача и обратка), расход теплоносителя 215 кг/ч - удельные потери давления  $R_{уд} = 47$  Па/м, скорость движения воды – 0,24 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 2,03 кПа.

3. Сопротивление термостатического клапана – 2,7 кПа.

4. Сопротивление ручного балансировочного клапана – 4,2 кПа.

5. Сопротивление теплосчетчика – 3,2 кПа.

6. Сопротивление ручного балансировочного клапана (клапана-партнера) и автоматического балансировочного клапана – 16,1 кПа.

7. Сопротивления в магистральных стояках – 4,26 кПа (подача и обратка).

8. Сопротивление теплообменника 20 кПа (проектные данные) и дополнительного оборудования теплового пункта (грязевик, 3 шаровых крана, обратный клапан) – до 5 кПа.

Суммарные сопротивления – 58,33 кПа.

Б. Фактические диаметры трубопроводов

Сопротивление главного циркуляционного кольца:

1. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 14 мм, длина 19,4 м (подача и обратка), расход теплоносителя 59 кг/ч - удельные потери давления  $R_{уд} = 85$  Па/м, скорость движения воды – 0,22 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 1,98 кПа.

2. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 18 мм, длина 36 м (подача и обратка), расход теплоносителя 215 кг/ч - удельные потери давления  $R_{уд} = 225$  Па/м, скорость движения воды – 0,47 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 9,72 кПа.

3. Сопротивление термостатического клапана – 2,7 кПа.

4. Сопротивление ручного балансировочного клапана – 4,2 кПа.

5. Сопротивление теплосчетчика – 3,2 кПа.

6. Сопротивление ручного балансировочного клапана (клапана-партнера) и автоматического балансировочного клапана – 16,1 кПа.

7. Сопротивления в магистральных стояках – 4,26 кПа (подача и обратка).

8. Сопротивление теплообменника 20 кПа (проектные данные) и дополнительного оборудования теплового пункта (грязевик, 3 шаровых крана, обратный клапан) – до 5 кПа.

Суммарные сопротивления – 67,16 кПа.

#### **Расчет для секции здания в осях 12–20.**

В качестве примера выполнен расчет для квартиры в осях 12–15 на верхнем этаже, кольцо принято через отопительный прибор комнаты в осях А–Б, ось 12.

Расчетные тепловые потери комнаты – 1115 Вт, всех помещений квартиры – 4470 Вт. Настройка термостатического клапана рассматриваемого отопительного прибора – 4, марка клапана RA-N, диаметр 15 мм. Настройка ручного балансировочного клапана квартиры – 1,1, марка клапана STAD, диаметр 20 мм. Настройка клапана-партнера в поквартирном узле – 3,4, марка клапана STAD, диаметр 20 мм. Марка автоматического балансировочного клапана STAP, диаметр 20 мм. Марка теплосчетчика ТС-07 к50, диаметр 15 мм.

*Результаты расчетов:*

#### А. В соответствии с проектом

Сопротивление циркуляционного кольца:

1. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 16 мм, длина 17,4 м (подача и обратка), расход теплоносителя 49 кг/ч - удельные потери давления  $R_{уд} = 26$  Па/м, скорость движения воды – 0,12 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 0,54 кПа.

2. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 25 мм, длина 19 м (подача и обратка), расход теплоносителя 192 кг/ч – удельные потери давления  $R_{уд} = 39$  Па/м, скорость движения воды – 0,21 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 0,89 кПа.

3. Сопротивление термостатического клапана – 1,9 кПа.

4. Сопротивление ручного балансировочного клапана – 5,76 кПа.

5. Сопротивление теплосчетчика – 3,2 кПа.

6. Сопротивление ручного балансировочного клапана (клапана-партнера) и автоматического балансировочного клапана – 13,1 кПа.

7. Сопротивления в магистральных стояках – 4,2 кПа (подача и обратка).

8. Сопротивление теплообменника 20 кПа (проектные данные) и дополнительного оборудования теплового пункта (грязевик, 3 шаровых крана, обратный клапан) – до 5 кПа.

Суммарные сопротивления – 51,39 кПа.

#### Б. Фактические диаметры трубопроводов

Сопротивление циркуляционного кольца:

1. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 16 мм, длина 17,4 м (подача и обратка), расход теплоносителя 49 кг/ч – удельные потери давления  $R_{уд} = 60$  Па/м, скорость движения воды – 0,21 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 1,25 кПа.

2. Трубопровод полиэтиленовый диаметром 25 мм, длина 19 м (подача и обратка), расход теплоносителя 192 кг/ч – удельные потери давления  $R_{уд} =$

186 Па/м, скорость движения воды – 0,41 м/с. Сопротивление с учетом местных потерь – 4,24 кПа.

3. Сопротивление термостатического клапана – 1,9 кПа.

4. Сопротивление ручного балансировочного клапана – 5,76 кПа.

5. Сопротивление теплосчетчика – 3,2 кПа.

6. Сопротивление ручного балансировочного клапана (клапана-партнера) и автоматического балансировочного клапана – 13,1 кПа.

7. Сопротивления в магистральных стояках – 4,2 кПа (подача и обратка).

8. Сопротивление теплообменника 20 кПа (проектные данные) и дополнительного оборудования теплового пункта (грязевик, 3 шаровых крана, обратный клапан) – до 5 кПа.

Суммарные сопротивления – 58,65 кПа.

Результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы.

Для секции здания в осях 1–12 суммарные гидравлические сопротивления в системе отопления составляют 58,33 кПа для проектных диаметров трубопроводов в квартире (16 и 25 мм) и 67,16 кПа для фактических трубопроводов (14 и 18 мм). Потери давления в остальных частях системы левой секции здания (циркуляционных кольцах) равны либо менее указанных.

Для секции здания в осях 12–20 суммарные гидравлические сопротивления в системе отопления составляют 51,39 кПа для проектных диаметров трубопроводов в квартире (16 и 25 мм) и 58,65 кПа для фактических трубопроводов (14 и 18 мм). Потери давления в остальных частях системы правой секции здания (циркуляционных кольцах) равны либо менее указанных.

Для анализа функционирования системы отопления при максимальных расходах теплоносителя, рассмотрим параметры установленного в индивидуальном тепловом пункте насосного оборудования.

В качестве циркуляционного насоса в индивидуальном тепловом пункте применен насос

Wilо Stratos D 65/1–12. Его характеристики показаны на рисунке 3.

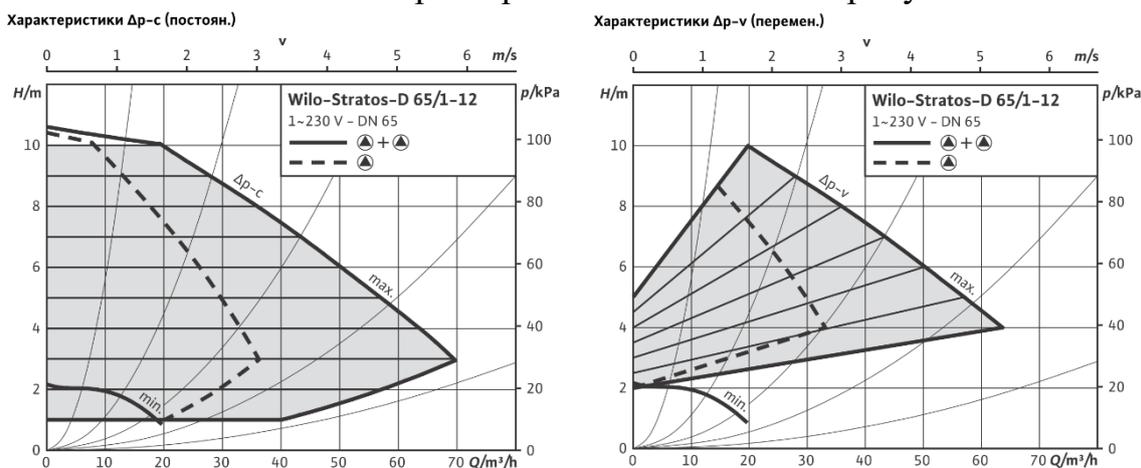


Рисунок 3 – Характеристики насоса Wilо Stratos D 65/1-12

Максимальный расчетный расход системы отопления здания составляет 14,2 м<sup>3</sup>/ч (проектные данные). Насос Wilо Stratos D 65/1-12 обеспечит циркуляцию

такого расхода (при работе одного насоса в односкоростном режиме или энергосберегающем режиме), обеспечивая напор 8,5 м, то есть при сопротивлении системы 85 кПа, что выше максимального расчетного значения 67,16 кПа. Таким образом, установленного насоса достаточно для работы системы отопления с фактическими диаметрами трубопроводов.

Также следует отметить, что фактически примененные диаметры трубопроводов в большей степени согласуются с рекомендациями производителей полимерных трубопроводов по параметрам оптимальной расчетной скорости движения воды и удельной потери давления на трение, чем проектные значения.

### **Проверка внешних авторитетов термостатических клапанов**

Следует отметить, что уменьшение диаметров трубопроводов приводит к увеличению гидравлических сопротивлений и, как следствие, уменьшению авторитетов термостатических клапанов.

Внешний авторитет термостатического клапана (авторитет в системе трубопроводов) — доля потерь давления на максимально открытом термостатическом клапане от располагаемого давления регулируемого участка системы водяного отопления. Участок системы отопления, на котором термостатический клапан осуществляет регулировку расхода теплоносителя, называют регулируемым. Он включает трубопроводы с отопительным прибором и арматурой. В системе отопления таким участком является либо вся система, либо ее часть, в которой автоматически поддерживается постоянный перепад давления. [1].

Величина внешнего авторитета термостатического клапана определяется как отношение перепада давлений в термостатическом клапане к общему перепаду давлений в системе водяного отопления или в той части системы, в которой автоматически поддерживается заданный перепад давлений. Рекомендуется поддерживать значение авторитета на каждом клапане двухтрубной системы водяного отопления в интервале от 0,3 до 0,7 [1, 4, 5].

Выполним проверку внешних авторитетов термостатических клапанов.

#### **Расчет для квартиры в секции здания в осях 1–12**

*Результаты расчетов авторитетов:*

##### А. в соответствии с проектом

Сопротивление термостатического клапана – 2,7 кПа.

Суммарные сопротивления поквартирной системы – 12,97 кПа.

Внешний авторитет термостатического клапана  $a = 0,2$ .

##### Б. фактические диаметры трубопроводов

Сопротивление главного циркуляционного кольца:

Сопротивление термостатического клапана – 2,7 кПа.

Суммарные сопротивления поквартирной системы – 21,8 кПа.

Внешний авторитет термостатического клапана  $a = 0,12$ .

#### **Расчет для квартиры в секции здания в осях 12-20**

*Результаты расчетов авторитетов:*

##### А. в соответствии с проектом

Сопротивление термостатического клапана – 1,9 кПа.

Суммарные сопротивления поквартирной системы – 12,29 кПа.

Внешний авторитет термостатического клапана  $a = 0,15$ .

#### Б. фактические диаметры трубопроводов

Сопротивление главного циркуляционного кольца:

Сопротивление термостатического клапана – 1,9 кПа.

Суммарные сопротивления поквартирной системы – 16,35 кПа.

Внешний авторитет термостатического клапана  $a = 0,116$ .

### **Заключение**

При монтаже системы водяного отопления рассматриваемого дома поквартирные ветви системы отопления были смонтированы полиэтиленовыми трубопроводами диаметром  $18 \times 2,5$  мм и  $14 \times 2$  мм вместо проектных  $25 \times 3,5$  мм и  $16 \times 2$  мм. Расчеты показали, что установленного насоса достаточно для работы системы отопления с фактическими диаметрами трубопроводов.

Однако следует отметить, что уменьшение диаметров трубопроводов привело к увеличению гидравлических сопротивлений и, как следствие, уменьшению авторитетов термостатических клапанов. В рассматриваемом случае проектные значения авторитетов термостатических клапанов  $a$  составляли  $0,15 \dots 0,2$  и не входили в рекомендуемый диапазон. В фактически смонтированной системе отопления авторитеты термостатических клапанов  $a$  снизились до значений  $0,116 \dots 0,15$ . Следствием уменьшения авторитетов является снижение эффективности регулирования системой отопления, то есть снижаются возможности по экономии тепловой энергии.

### **Список цитированных источников**

1. Sustainable consumption of thermal energy and optimum design of water heating system/ Usikov S.M. – International Journal of Civil Engineering and Technology – 9 (2) – 2018. – С. 755–764.
2. Energy efficiency of multi-apartment residential houses with individual heat supply/ Uladzimir Navaseltsau, Dzina Navaseltsava, Mikhail Shenogin– IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 896 (2020) 012057. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012057>.
3. Energy consumption of modern residential houses of the same energy efficient classes/ Uladzimir Navaseltsau, Vitali Khaletski, Vladimir Melnikov – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 896 (2020) 012056. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012056>.
4. Пырков, В. В. Гидравлическое регулирование систем отопления и охлаждения. Теория и практика / В. В. Пырков – Киев : изд. «Такі справи», 2010. – 304 с.
5. Яшуветц, Р. Гидравлика – сердце водяного отопления / Р. Яшуветц – Издание компании HERZ Armaturen GmbH – Вена : 2005. – 143 с.

УДК 621

**ПРИМЕНЕНИЕ АККУМУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ  
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

*А. О. Овулягулыев, Д. Г. Шамыев, Т. К. Ейебердыева*

Государственный энергетический институт Туркменистана,  
г. Мары, Туркменистан

**Аннотация**

В данной научной статье представлен обзор перспективы использования солнечной и ветровой энергии, где также огромный интерес представляет система аккумулирования энергии, что в свою очередь увеличивает надежность энергообеспечения населенных пунктов.

**Ключевые слова:** аккумулирование, разработка, возобновляемые источники, солнечные-ветровые энергии.

**APPLICATION OF BATTERY DEVICES IN ELECTRICAL SYSTEM  
USING RENEWABLE ENERGY SOURCES**

*A. O. Ovulyagulyew, D. G. Shamyew, T. K. Eeberdiewa*

**Abstract**

This scientific article provides an overview of the use of solar and wind energy, which also provides an energy storage system, which, in turn, increases the reliability of energy supply to populated areas.

**Keywords:** accumulation, development, renewable sources, solar-wind energy.

**Введение**

Государственная «Концепция развития электроэнергетической отрасли Туркменистана на 2013–2020 годы» предусматривает изучение возможности производства электрической энергии на основе использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

В целях подготовки кадров в области ВИЭ, начиная с 2014 года, в Государственном энергетическом институте Туркменистана начали подготовку специалистов по направлению «Альтернативные источники энергии». Также в институте установлены солнечные и ветровые установки для выработки электроэнергии, на которых специалисты института ведут научно-исследовательскую работу. Все научные разработки проводятся под руководством Академии наук Туркменистана.

Кабинет Министров Туркменистана содействует реализации проектов по производству электрической энергии с использованием возобновляемых источников энергии. Министерство энергетики Туркменистана разрабатывает и ре-

лизует меры по рациональному использованию электрической энергии и топливно-энергетических ресурсов, а также по использованию возобновляемых источников энергии [1].

15 октября 2016 года Меджлис Туркменистана ратифицировал Парижское соглашение, одобренное на Конференции по климату (COP-21) в Париже 12 декабря 2015 года и подписанное Туркменистаном 23 сентября 2016 года в штаб-квартире ООН в Нью-Йорке.

### **Материалы и методы**

Возобновляемая энергия – это любая форма энергии от солнечных, ветряных или биологических источников, которая восполняется в результате естественных процессов, темпами, которые равны или превосходят темпы их использования. Возобновляемую энергию получают благодаря постоянным или повторяющимся потокам энергии, происходящим в окружающей среде. Она включает такие ресурсы, как биомасса, солнечная энергия, геотермальное тепло, гидроэлектроэнергия, приливы-отливы и волны, термальна́я энергия океана и энергия ветра. В то же время возможно использование биомассы или извлечение тепла из геотермального источника более быстрыми темпами по сравнению с темпами, которыми оно может восполняться благодаря потокам тепла. С другой стороны, показатель использования прямой солнечной энергии не оказывает никакого воздействия на скорость, с которой она достигает Земли. Ископаемые виды топлива (уголь, нефть, природный газ) не подпадают под это определение, поскольку они не восполняются в течение срока, который является относительно коротким по сравнению с темпами их использования.

### **Результаты и обсуждение**

Существует многоступенчатый процесс, во время которого первичная энергия преобразуется в энергоноситель. Технологии ВИЭ являются разнообразными и могут удовлетворять весь спектр потребностей в энергоуслугах. Различные типы ВИЭ могут снабжать электрической, термальной и механической энергией, а также производить топливо, которое способно удовлетворять многочисленные потребности в энергоуслугах.

Экономия энергии благодаря мерам по обеспечению энергоэффективности не всегда полностью реализуется на практике. Согласно оценкам, данный эффект отдачи ограничивается, вероятно, в результате эффектов насыщения от 10 до 30 % для систем отопления домов и использования автомашин в странах – членах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) и этот эффект является весьма незначительным в случае более эффективных приборов и систем водяного отопления. Мера по обеспечению энергоэффективности, которая является успешной в связи со снижением спроса на энергию в рамках всей экономики, также снижает цену на энергию, что ведет в свою очередь к снижению расходов на энергию в рамках всей экономики и дополнительной экономии расходов (более низкие цены на энергию и меньший объем использования энер-

гии). Предполагается, что эффект отдачи может быть более сильным в развивающихся странах и у малоимущих потребителей. Что касается изменения климата, то главной проблемой в связи с любым эффектом отдачи является его влияние на выбросы CO<sup>2</sup>.

На сегодняшний день глобальная энергетическая безопасность является приоритетным направлением для Туркменистана. Энергетическая безопасность должна включать в себя систему, производящую, передающую и потребляющую энергию. Такой комплексный подход составляет основу энергетической дипломатии страны, определяет направление практических действий Туркменистана в энергетической сфере.

Солнечная энергетика является самым быстроразвивающимся видом возобновляемой энергетики. Дело в том, что климатические и географические условия Туркменистана позволяют в нашей стране широко использовать возобновляемые источники энергии. Например, получать солнечную энергию и активно применять ее в промышленности с использованием фотоэлектрических преобразователей и в тепловой энергетике – с использованием солнечных коллекторов. Это, в частности, должно способствовать улучшению энергообеспечения сельского населения и территорий, удаленных от центральной системы энергоснабжения. Возможно использование энергии ветра, геотермальных вод, биотоплива.

Под аккумулярованием (накоплением) энергии понимается ввод какого-либо вида энергии в устройство, оборудование, установку или сооружение – в аккумулятор (накопитель) энергии – для того, чтобы эту энергию снова в том же или в преобразованном виде получить обратно в удобное для потребления время.

С целью снижения негативного воздействия деятельности людей на окружающую среду и истощения запасов полезных ископаемых, используемых для углеводородного топлива, сектор производства электроэнергии можно трансформировать за счет широкого использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). С учетом принимаемой концепции по интеграции генерирующих объектов на основе ВИЭ, а также с учетом характера их работы (периодические изменения в выработке энергии), аккумулярование энергии будет являться одной из ключевых технологий, имеющей решающее значение для обеспечения этой трансформации [2].

Аккумулярование само по себе не экономит энергию, а, наоборот, ведет к дополнительным потерям, но оно позволяет значительно облегчить управление потреблением энергии и, соответственно, во многих случаях может снизить ее нерациональное использование. Известно, что генерируемая электроэнергия большинства ВИЭ подвержена периодическим и случайным изменениям (ветровая, солнечная и гидроэнергия). При этом скорость потребления энергии потребителями изменяется во времени как в течение дня, так и года. Приведение в соответствие выработки и потребления энергии во времени может осуществляться посредством аккумулярования.

Также аккумулярование энергии может иметь большое значение для улучшения режимов работы электрических систем (ЭС). Например, аккумулярующие

устройства, имеющие высокое быстродействие и способность к мгновенному изменению мощности, могут быть применимы для улучшения статической и динамической устойчивости ЭС. При помощи аккумулирования можно снимать кратковременные пики нагрузки, снижать колебания при нерегулярных перетоках мощности. Данные устройства могут способствовать улучшению при стабилизации несимметричных режимов работы ЭС, поддержании частоты и напряжения в нужном диапазоне при их отклонении в ЭС.

Для выполнения разных функций, связанных с работой ЭС и с ВИЭ, мощность и энергоемкость аккумулирующих устройств должны быть неодинаковыми, как и их быстродействие. Например, если рассматривать применение систем аккумулирования для технологий ВИЭ, работающих на энергии ветра, как правило, можно учитывать два обстоятельства. Одно из них заключается в том, что колебания энергии ветра присутствуют на разных скоростях ветра, что требует от системы аккумулирования выравнивания графика выдаваемой мощности в разных временных диапазонах. Второе обстоятельство будет складываться из доминирующего характера нагрузок потребителя электрической энергии.

В системах аккумулирования, работающих в статическом режиме, преимущественно можно применять литий-ионные либо ванадиевые окислительно-восстановительные батареи, поскольку они могут обладать большой емкостью для поддержания выдаваемой мощности в заданном диапазоне. В системах, работающих преимущественно в динамическом режиме, можно использовать суперконденсаторы либо супермаховики. При применении в качестве возобновляемого источника энергии ветрогенератора нужно учитывать то, что колебания энергии ветра делятся на кратковременные и долговременные составляющие, поэтому для эффективного применения аккумулирующих систем можно использовать двухуровневые системы хранения, например, литий-ионные батареи и суперконденсаторы, ванадиевые редокс-батареи и супермаховики и т. д [3].

### **Заключение**

Таким образом, выбор аккумулирующих устройств может зависеть от параметров электрической сети и/или возобновляемого источника энергии. Применяя накопители энергии, можно аккумулировать электроэнергию, вырабатываемую от ВИЭ во время малых нагрузок (ночное время), и генерировать в дневное время при пиковых нагрузках. Преимущество аккумулирующих систем энергии заключается в возможности поддержания статических и динамических нагрузок электрической сети. Также аккумулирующие системы могут участвовать в накоплении электроэнергии из электросети в момент дефицита нагрузок и выдавать электроэнергию в момент повышенного спроса, а также способствовать поддержанию организованной системы противоаварийного управления и этим содействовать предотвращению каскадных аварий, что является одной из основных проблем электроэнергетики.

### Список цитированных источников

1. Государственная Концепция развития электроэнергетической отрасли Туркменистана на 2013–2020 г. – Ашгабат.
2. Маскевич, С. А. Сахаровские чтения 2019 года: экологические проблемы XXI века / С. А. Маскевич [и др.] // материалы 19-й Международной научной конференции, 23–24 мая 2019 г., г. Минск, Респ. Беларусь : в 3 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та; редколлегия: под ред. д-ра ф.-м. н., проф. С. А. Маскевича, д-ра с.-х. н., проф. С. С. Позняка. – Минск: ИВЦ Минфина, 2019. – 300 с.
3. Арский, Ю. М. Экологическая экспертиза: Обзорная информация. Выпуск № 6 / Ю. М. Арский. – Москва : ВИНТИ, 2018. – 145 с.

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ БИОЭНЕРГЕТИКИ В ТУРКМЕНИСТАНЕ

*М. Р. Оразбердиева<sup>1</sup>, Г. Я. Джумадурдыева<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Научный сотрудник научно-производственного центра «Возобновляемые источники энергии» Государственного энергетического института Туркменистана, город Мары, Туркменистан, mahribanorazberdyeva@gmail.com

<sup>2</sup> Студентка 2-го курса Государственного энергетического института Туркменистана, город Мары, Туркменистан, guljahanyagshy@gmail.com

### **Аннотация**

Туркменистан, будучи экономически развивающейся страной, придает большое значение использованию возобновляемых источников энергии, в том числе и биоэнергетике. Для развития биоэнергетики целесообразно использовать биоэнергетическое сырье на основе местных ресурсов. Возможности применения местных ресурсов в целях биоэнергетики во многом зависят от объема ресурсной базы. В статье приводится сравнительный анализ, основывающийся на данных научных исследований, проводимых в НПЦ «Возобновляемые источники энергии» ГЭИТ.

**Ключевое слово.** Биоэнергетика, масличные культуры, биомасса, утилизация отходов, дренажные воды, биотехнология.

## COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE RAW MATERIAL BASE OF BIOENERGY IN TURKMENISTAN

*<sup>1</sup>M. R. Orazberdiyeva, <sup>2</sup>G. Ya. Jumadurdyeva*

### **Abstract**

Turkmenistan, being an economically developing country, attaches great importance to the use of renewable energy sources, including bioenergy. For the development of bioenergy, it is advisable to use bioenergy raw materials based on local resources. The possibility of using local resources for bioenergy purposes largely depends on the size of the resource base. The article provides a comparative analysis based on scientific research data conducted at the Scientific and Production Center "Renewable Energy Sources" of SEIT.

**Keywords:** Bioenergy, oilseeds, biomass, waste management, drainage water, biotechnology.

### **Введение**

Туркменистан, обладая богатейшими запасами энергоносителей, уделяет огромное внимание поиску новых экологически чистых источников энергии. В стране принята Национальная стратегия развития возобновляемой энергетики до 2030 года, а в целях усиления правовой базы для ее реализации – Закон Туркме-

нистана о возобновляемых источниках энергии (2021 г.) [1]. Целью национальной стратегии является обеспечение экономической, продовольственной, водной и экологической безопасности страны путем подготовки мер по внедрению возобновляемых источников энергии в производство. Реализация Национальной стратегии будет способствовать устойчивому экономическому развитию страны.

Одной из форм возобновляемой энергии является биоэнергетика. Биоэнергия – один из видов возобновляемых источников энергии. Для производства биоэнергии в настоящее время в некоторых странах в качестве сырья используются различные масличные культуры. Наиболее широко применяемыми в мире является рапс, кукуруза, пальма и соевые бобы [2].

Территория Туркменистана характеризуется резкой континентальностью климата. В условиях аридной зоны страны наблюдается низкая продуктивность орошаемых земель. Орошаемые массивы земель характеризуются продолжительностью вегетационного периода, высокой суммой эффективных температур, которые создают благоприятные условия для возделывания любой сельскохозяйственных культуры, кроме чая и кофе (только при орошении). Здесь получают высокие урожаи масличных культур [3]. В таблице 1 приводится сравнительная таблица масличных культур как энергоисточников.

**Таблица 1** – Сравнительная таблица масличных культур как энергоисточников.

Культура	Средняя урожайность, ц/га	Масличность, %	Водопотребление, м <sup>3</sup> /га	Энергосодержание по маслу, ГДж/га
Соя	25	22	4500	42
Кунжут	15	60	4200	62
Подсолнечник	20	60	3000	54
Микроводоросли	11204	55	—	104

Как показано в таблице 1, выращивание масличных культур в условиях Туркменистана для энергетических целей требует большое количество воды. В условиях климатических изменений и ограниченности водных ресурсов выращивание энергетических культур, требующих большого количества воды, экономически нецелесообразно. Биоэнергию также можно получить из микроводорослей [4].

С середины прошлого века в Туркменистане проводятся научные исследования по изучению микроводорослей. В результате этих исследований было установлено, что в водоемах страны встречается 827 видов водорослей. Среди них одно из главных мест занимают зеленые водоросли [5]. Зеленые водоросли отличаются от обычных растений разнообразием, химической стабильностью и высокой приспособляемостью. При изменении питательной среды микроводоросли в значительной степени меняют морфологическую структуру, скорость роста, деление, плодовитость и химический состав клеток. Микроводоросли отличаются от наземных растений устойчивостью к кислотности и засоленности питательной среды. Они переносят также кратковременные изменения водородного показателя пищевой среды в пределах 1–12. Количество витаминов, белков, жи-

ров, углеводов и других веществ в биомассе микроводорослей зависит от питательной среды, температуры и освещенности. Например, когда питательная среда богата азотом, микроводоросли синтезируют большое количество белка. Если в питательной среде мало азота, то микроводоросли начинают синтезировать больше жиров и углеводов.

Макроэлементы, такие как N, P, K, Mg, S, и микроэлементы, такие как F, Mn, Cu, Zn, Mo, B и Co необходимы для нормального роста микроводорослей [6]. Также в пищевой среде микроводорослей встречаются такие элементы, как Cd, Cr, Ni, V, W, Al, Pb, Sn, F, As, Se, Hg, относящиеся к макро- и микроэлементам. Микроводоросли сохраняют свою жизнеспособность даже при резком изменении концентрации и температуры питательной среды. Высокий уровень роста сохраняется после нормализации концентрации питательной среды.

В настоящее время в Туркменистане на орошаемых площадях образуется около 6 миллиардов кубометров дренажных вод. Были проведены многолетние исследования и разработаны рекомендации по использованию этой воды для орошения солеустойчивых кормовых культур [7]. Однако возможности использования дренажных вод для энергетических целей до сих пор не уделяется должного внимания.

С развитием орошаемых земель увеличивается объем коллекторно-дренажных вод. Они образуются в результате периодических поливов, когда отмечается избыточный полив, а также при рассолении почв промывкой. Во время избыточного полива определенная часть минеральных удобрений смывается и затем попадает в дренаж. Дренажные воды региона характеризуется как среднеминерализованные воды. Основными загрязнителями воды в открытой дренажной сети являются: ионы кальция, магния, натрия, гидрокарбонаты, сульфаты, хлориды формирующие ионно-солевой состав дренажных вод. Дренажные воды так же содержат основные биогенные элементы (N, P, S, Mg, K, Ca). Количественный и качественный анализ ионного состава дренажных вод показал, что они могут быть применены в разработке технологий питательной среды для выращивания микроводорослей. Была установлена жизнеспособность микроводоросли *Chlorella vulgaris* в дренажной воде [8-9].

### **Заключение**

В связи с наличием достаточного количества ресурсов наиболее перспективным направлением развития сырьевой базы биоэнергетики Туркменистана является выращивание микроводорослей в дренажных водах.

Преимущества выращивания микроводорослей в сточных водах объясняются тем, что они не наносят вреда продовольственной безопасности, размножаются в 15–20 раз быстрее, чем другие растения, дешевле в переработке, так как не имеют твердой оболочки, не оказывают вредное воздействие на окружающую среду. Практическая значимость производства биомассы микроводорослей представляет собой утилизацию дренажных вод, сформированных на орошаемых полях и трансформацию возобновляемой энергии с целью получения энергетического сырья.

### Список цитированных источников

1. О возобновляемых источниках энергии: Закон Туркменистана. Ашхабад : 2021.
2. Анализ развития производства биоэнергетического топлива / Н. Ю. Курнакова [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9 (2). – С. 268–272.
3. Соя – полезная культура / Оразбердиева // Новое село. Научно-производственный журнал Министерства сельского хозяйства Туркменистана – 2008. № 9, 32 с.
4. Ильвицкая, С. В. Применение микроводорослей в биоэнергетике с использованием технологии улавливания и хранения углерода / С. В. Ильвицкая, А. Г. Чистякова // Международный научно-исследовательский журнал – № 11 (113) – 2021. – Ч. 1.
5. Состояние биологического разнообразия. Обзор. // Министерство охраны природы Туркменистана – Ашхабад : 2002.
6. Упитис, В. В. Макро- и микроэлементы в оптимизации минерального питания микроводорослей / В. В. Упитис. – Рига : Зинаьге – С. 296.
7. Эсенов, П. Проблемы деградации земель и некоторые пути их решения / П. Эсенов // Проблемы освоения пустынь. – 2006. – № 4.
8. Джумадурдыев, О. Изучение возможностей культивирования микроводорослей в дренажных водах / О. Джумадурдыев, М. Р. Оразбердиева, М. Ш. Шыхыева // Вестник Сыктывкарского университета. – Серия 2, Биология, геология, химия, экология. – 2023. – № 1 (25). С. 26–30. <https://doi.org/10.34130/2306-6229-2023-1-26>.
9. Хамидов, М. Х. Снижение минерализации коллекторно-дренажных вод / М. Х. Хамидов, У. А. Жураев // Аграрная наука. – 2018. – (10). С. – 52–54. <https://doi.org/10.3263/0869-8155-2018-319-10-52-54>.

# УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ В ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНЫХ УСТАНОВКАХ С ТЕПЛОВЫМ НАСОСОМ

*В. А. Пухкал<sup>1</sup>, М. М. Петров<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Канд. тех. наук, доцент, СПбГАСУ, Санкт-Петербург, Россия,  
pva1111@rambler.ru

<sup>2</sup>Аспирант, СПбГАСУ, Санкт-Петербург, Россия, michaelpetrov1998@yandex.ru

## **Аннотация**

В статье описывается современное состояние вопроса утилизации тепловой энергии воздушными тепловыми насосами в приточно-вытяжных установках систем вентиляции и кондиционирования воздуха, а также способы повышения энергоэффективности таких установок.

Выделены две основные компоновки элементов теплового насоса (компрессора, конденсатора и испарителя) в составе приточно-вытяжной установки.

Установлено, что компоновка с размещением компрессорно-испарительного агрегата перед теплоутилизатором в канале вытяжного воздуха и конденсатора за теплоутилизатором в канале приточного воздуха по направлению движения воздушного потока имеет коэффициент преобразования энергии, равный 5,7.

**Ключевые слова:** системы вентиляции, приточно-вытяжные установки, воздушный тепловой насос, энергоэффективность.

## **HEAT RECOVERY IN SUPPLY AND EXHAUST INSTALLATIONS WITH A HEAT PUMP**

*V. A. Puhkal<sup>1</sup>, M. M. Petrov<sup>2</sup>*

## **Abstract**

This article describes the current state of the issue of heat energy utilization by air heat pumps in supply and exhaust installations of ventilation and air conditioning systems, as well as ways to improve the energy efficiency of such installations.

The study identifies two main layouts of elements of a heat pump (compressor, condenser and evaporator), which is part of the supply and exhaust system.

As a result, it was found that the configuration with the placement of the compressor-evaporative unit in front of the heat exchanger in the exhaust air channel and the condenser behind the heat exchanger in the supply air channel in the direction of the air flow has an energy conversion coefficient equal to 5.7.

**Keywords:** ventilation systems, supply and exhaust installations, air heat pump, energy efficiency.

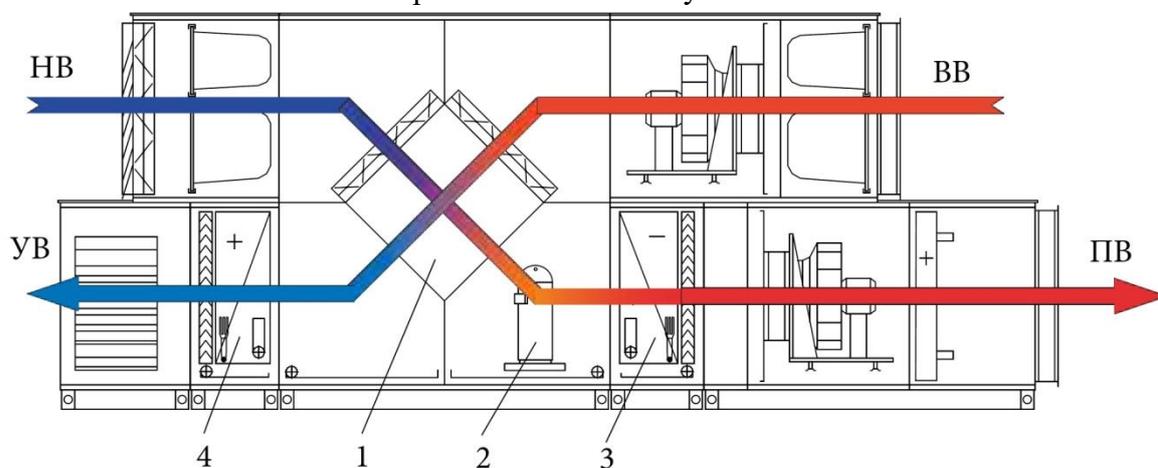
## **Введение**

Эффективное применение тепловых насосов (ТН) в системах вентиляции и кондиционирования воздуха с целью утилизации теплоты удаляемого вентиляционного воздуха является одним из практических направлений энергосбережения и охраны окружающей среды [1–10]. В настоящее время возрастают требования к качеству жизни, что неминуемо приводит к более высоким стандартам и

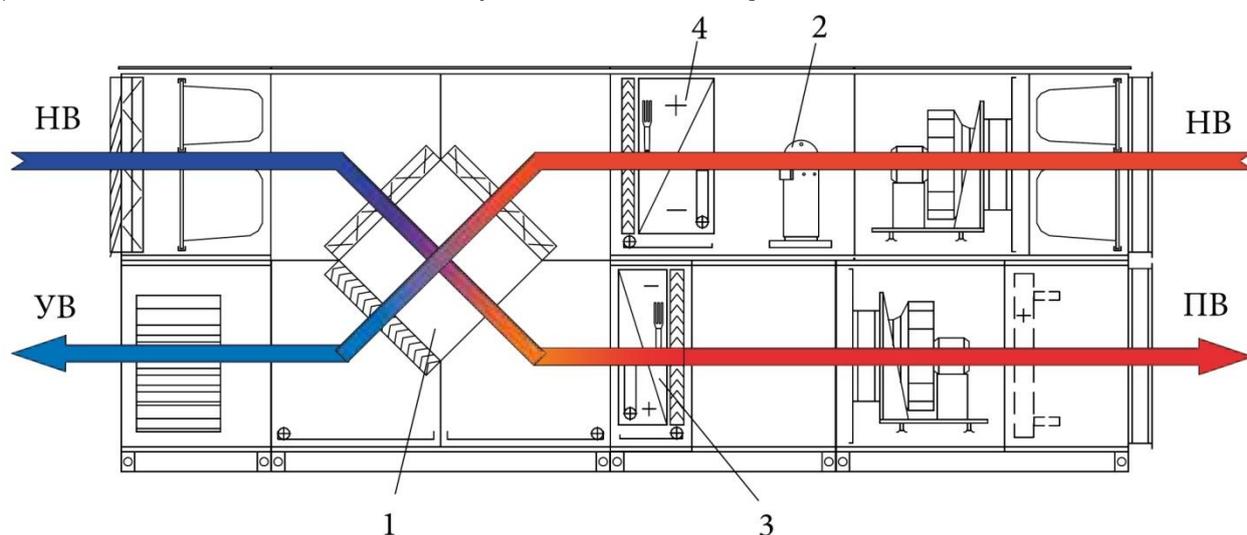
характеристикам вентиляционных систем. В итоге одной из задач в строительстве является внедрение все более совершенных технологий.

В холодный период года при работе приточных систем вентиляции и кондиционирования воздуха в окружающую среду выбрасывается вытяжной внутренний воздух, содержащий большое количество теплоты, расходуемой на нагрев приточного воздуха, подаваемого в помещения здания. Это приводит к возрастанию роли утилизаторов теплоты в системах вентиляции. Наиболее эффективной схемой обработки воздуха с целью утилизации теплоты удаляемого вентиляционного воздуха является применение утилизаторов различного типа (пластинчатых рекуперативных, роторных регенеративных, систем утилизации теплоты с промежуточным теплоносителем) и тепловых насосов (рисунок 1) [11].

а) компоновка 1 теплового насоса приточно-вытяжной установки



б) компоновка 2 теплового насоса приточно-вытяжной установки



1 – утилизатор теплоты; 2 – компрессор; 3 – конденсатор; 4 – испаритель; НВ – наружный воздух; ПВ – приточный воздух; ВВ – внутренний воздуха; УВ – удаляемый воздух

**Рисунок 1** – Приточно-вытяжные установки с пластинчатым перекрестноточным утилизатором теплоты и тепловым насосом

По расположению элементов теплового насоса (компрессора, конденсатора и испарителя) можно выделить две компоновки (рисунок 1; стрелками показаны направления воздушных потоков при работе теплового насоса в холодный период года.

Компоновка 1: компрессорно-конденсаторный агрегат расположен за теплоутилизатором в канале приточного воздуха; испаритель находится за теплоутилизатором в канале удаляемого воздуха по направлению движения воздушного потока.

Компоновка 2: компрессорно-испарительный агрегат расположен перед теплоутилизатором в канале вытяжного воздуха; конденсатор располагается за теплоутилизатором в канале приточного воздуха по направлению движения воздушного потока.

Для примера на рисунке 1 показаны пластинчатые перекрестноточные рекуперативные утилизаторы теплоты удаляемого вентиляционного воздуха.

Особое внимание в приточно-вытяжных установках с тепловым насосом уделяется воздухо-воздушным теплообменникам (теплоутилизаторам). Эффективность утилизации теплоты в них зависит от множества факторов: конструкции, используемых материалов, отношения площади теплообмена к общему размеру, а также показателей самих воздушных потоков на обеих сторонах.

Варианты компоновок приточно-вытяжных установок с различными типами утилизаторов теплоты удаляемого вентиляционного воздуха приведены на рисунках 2 и 3.

Тепловой насос является своего рода трансформатором теплоты, перекачивая ее от среды низкого температурного потенциала к среде более высокого потенциала. При использовании ТН в системе вентиляции, в роли источника теплоты выступает вытяжной воздух, который имеет температуру выше, чем приточный, выступающий в качестве потребителя. Наибольшее распространение в системах вентиляции и кондиционирования воздуха получили пароконденсационные тепловые насосы, в которых используется теплота испарения и конденсации при совершении обратного термодинамического цикла.

В настоящей работе поставлена цель проанализировать различные компоновки приточно-вытяжных установок с утилизаторами теплоты и тепловыми насосами (рисунок 1).

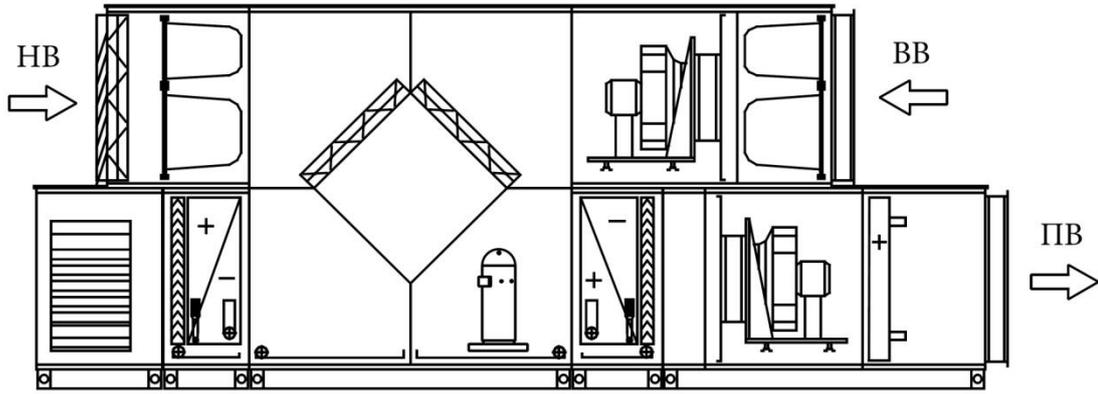
### **Материалы и методы**

Эффективность ТН выражается коэффициентом преобразования энергии (далее КПЭ), который в свою очередь равен отношению полученной тепловой и затраченной электрической энергии:

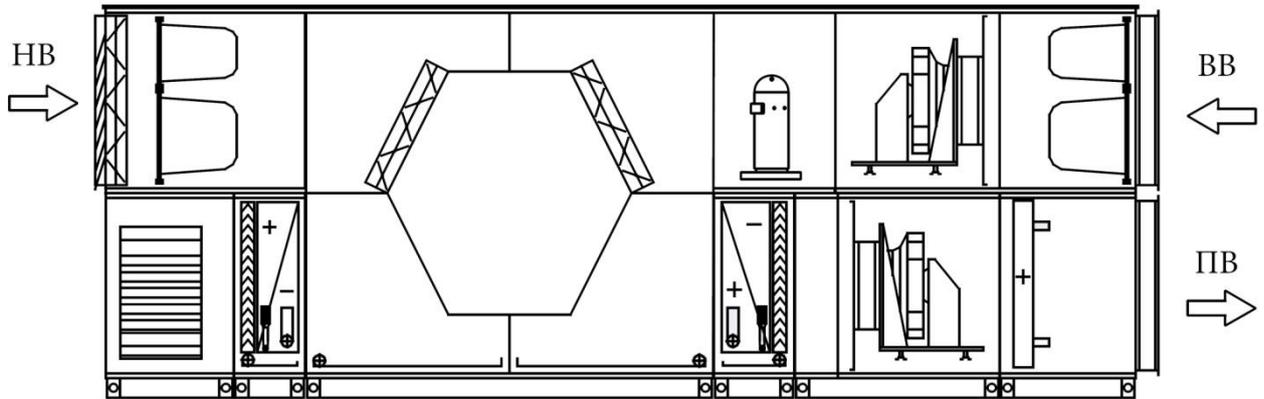
$$\text{КПЭ} = \frac{Q_h}{Q_e} k_a k_g,$$

где  $Q_h$  – полная теплопроизводительность цикла;  $Q_e$  – мощность привода компрессора;  $k_a, k_g$  – коэффициенты, учитывающие потери на аэродинамические и гидравлические сопротивления в системе.

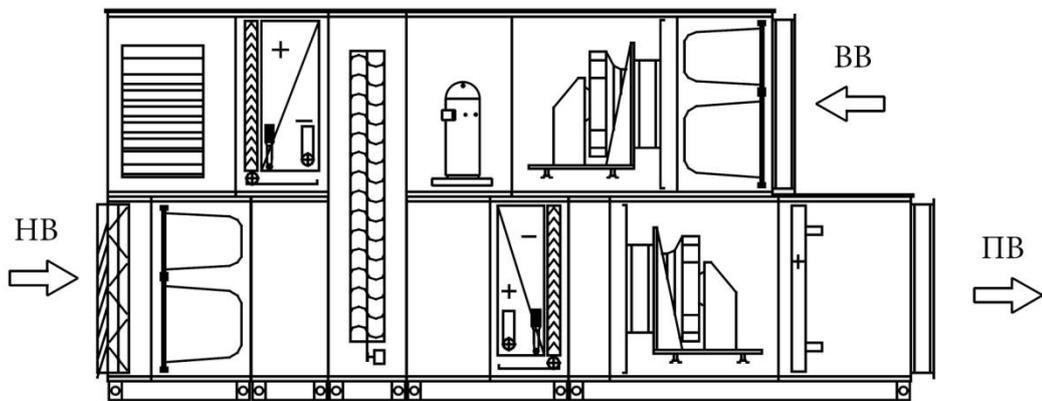
а) с пластинчатым перекрестноточным утилиза­тором теплоты рекуперативного типа



б) с пластинчатым перекрестнопротивоточным утилиза­тором теплоты рекуперативного типа



в) с роторным утилиза­тором теплоты регенеративного типа



г) с утилиза­тором теплоты с промежуточным теплоносителем

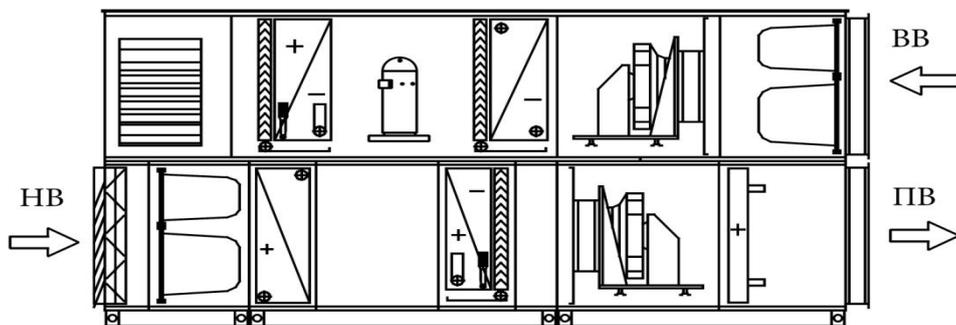
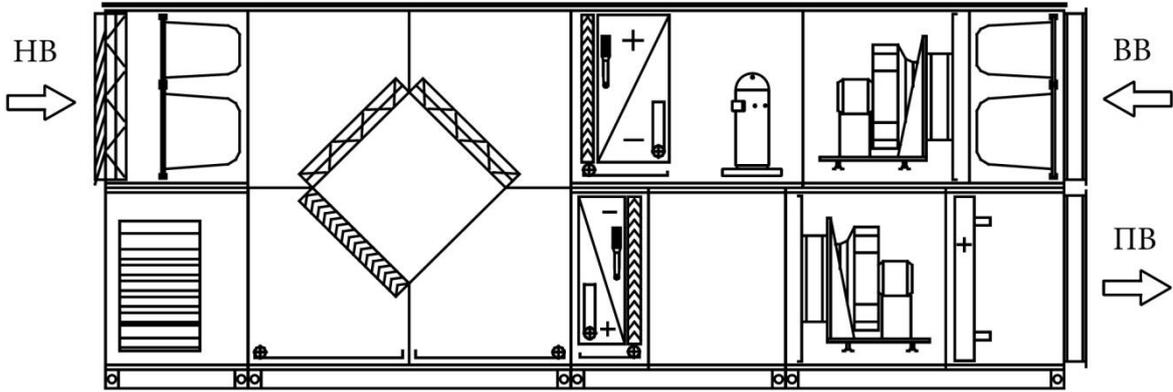
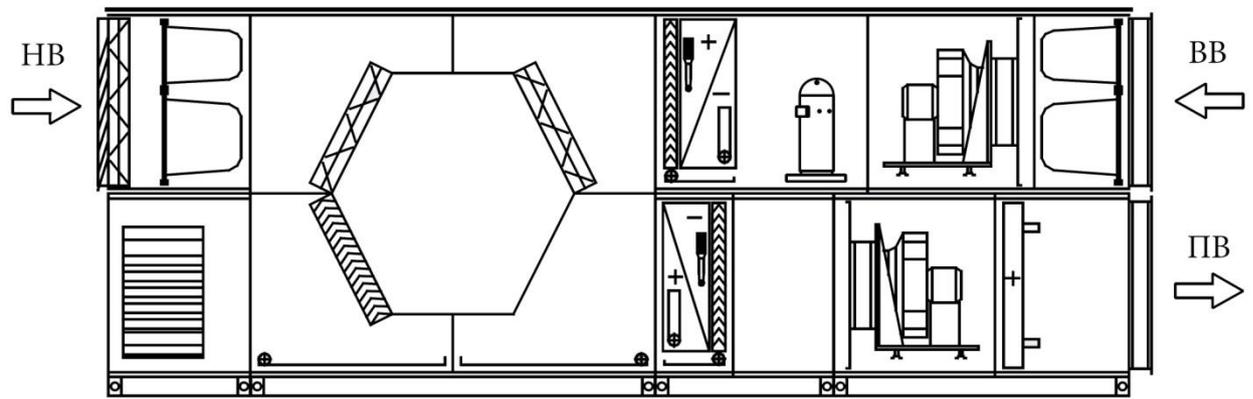


Рисунок 2 – Приточно-вытяжные установки с тепловым насосом компоновки 1

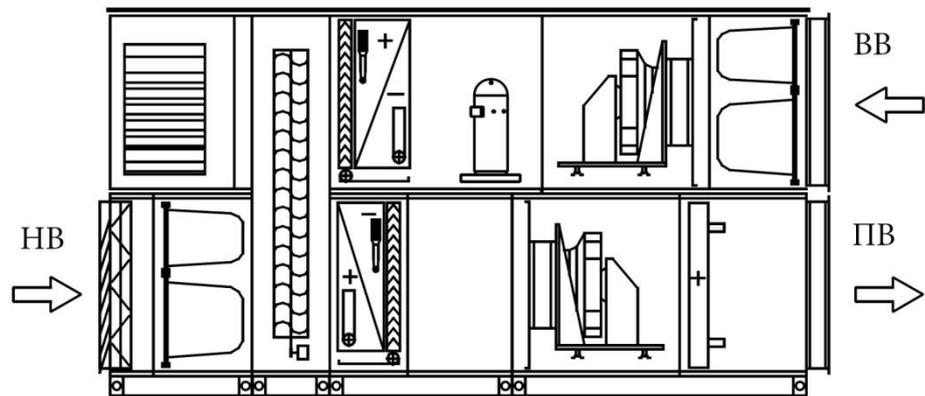
а) с пластинчатым перекрестноточным утилизатором теплоты рекуперативного типа



б) с пластинчатым перекрестнопротивоточным утилизатором теплоты рекуперативного типа



в) с роторным утилизатором теплоты регенеративного типа



г) с утилизатором теплоты с промежуточным теплоносителем

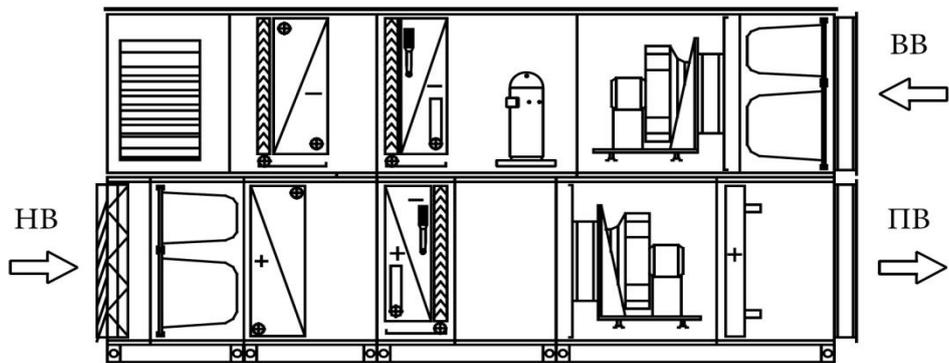
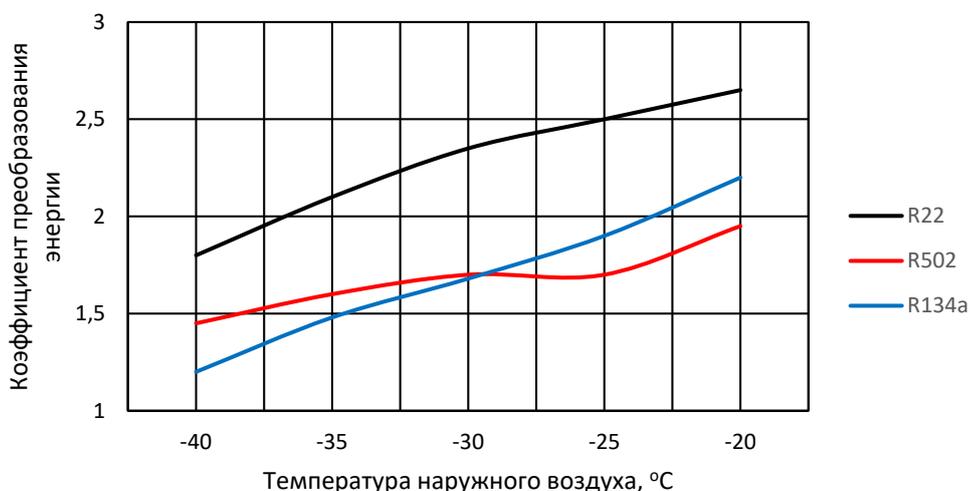


Рисунок 3 – Приточно-вытяжные установки с тепловым насосом компоновки 2

Эффективность работы ТН зависит от ряда факторов, которые можно разделить на внутренние и внешние. К первым стоит отнести совершенство контура ТН, ко вторым – условия его эксплуатации. Основная часть потерь давления приходится на испаритель – около 82 %. Данный фактор сильно сказывается на эффективности теплового насоса и, следовательно, влияет на КПЭ и его необходимо учитывать при проектировании [6].

Одним из способов повышения эффективности ТН является уменьшение степени сжатия в компрессоре, поэтому КПЭ ТН с ростом температуры низкопотенциального источника растет. Конкретные показатели зависимости КПЭ от температуры наружного воздуха представлены на рисунке 4 [1].



**Рисунок 4** – Зависимость КПЭ от температуры наружного воздуха для хладагентов R134a, R22 и R502 [7]

**Результаты и обсуждение.** Сравнение показателей приточно-вытяжных установок со встроенными тепловыми насосами выполнено по данным [11] для компоновок 1 и 2 (таблица 1). В конструкции установок применялись пластинчатые утилизаторы теплоты рекуперативного типа.

**Режим работы приточно-вытяжной установки при компоновке 1 теплового насоса в холодный период года.**

Предварительный подогрев приточного воздуха осуществляется в утилизаторе теплоты, затем нагрев в компрессорно-конденсаторном блоке теплового насоса. При необходимости включается в работу дополнительный воздушонагреватель.

Контур холодильного цикла оснащен системой автоматического оттаивания посредством реверсирования работы. В связи с этим рекомендуется оборудовать приточно-вытяжную установку дополнительным воздушонагревателем для использования в период низких температур наружного воздуха. Чаще всего это водяной или электрический воздушонагреватель.

Внутренний воздух первоначально охлаждается в утилизаторе, а затем в испарителе теплового насоса.

**Таблица 1** – Сравнение характеристик приточно-вытяжных установок со встроенным тепловым насосом и пластинчатым перекрестноточным утилизатором теплоты рекуперативного типа

Показатели	Значения показателей	
	Компоновка 1	Компоновка 2
Номинальный расход воздуха: – приточного, м <sup>3</sup> /ч; – вытяжного, м <sup>3</sup> /ч.	10000	10000
Параметры наружного воздуха (НВ): – температура, °С; – относительная влажность, %.	-15 90	-15 90
Параметры внутреннего воздуха (ВВ): – температура, °С; – относительная влажность, %.	22 45	22 45
Температура приточного воздуха, °С.	21	21,7
Мощность приточного вентилятора, кВт.	3,8	3,83
Мощность вытяжного вентилятора, кВт.	4,25	4,31
Мощность компрессора, кВт.	6,3	8,9
Максимальная тепловая мощность теплового насоса, кВт.	29,7	51,2
Температурная эффективность пластинчатого утилизатора теплоты, %.	73,3	78,9
КПЭ, кВт/кВт	4,7	5,7

Преимущество компоновки 1 в том, что теплота (холод) удаляемого воздуха максимально используется в течение всего года.

Недостатком является то, что при низких температурах в холодный период года появляется обледенение испарителя, поэтому необходим резервный источник теплоты.

#### **Режим работы приточно-вытяжной установки при компоновке 2 теплового насоса в холодный период года**

Наружный воздух сначала предварительно нагревается в утилизаторе, а затем энергия, полученная в воздухоохладителе, передается приточному воздуху в конденсаторе теплового насоса.

Внутренний воздух подогревается, охлаждая компрессор, охлаждается в испарителе теплового насоса, затем в утилизаторе теплоты.

В этой компоновке маловероятно, что обледенение может появиться на испарителе, поэтому в холодильном контуре не предусматривается реверсирование работы.

Для этой компоновки нет необходимости использовать дополнительный источник теплоты. Тепловой насос работает круглый год.

Преимущество в том, что тепловой насос безотказно работает в течение всего года. Компрессор всегда работает при температуре, при которой тепловой насос максимально эффективен.

Недостатком является то, что при низких температурах наружного воздуха в холодный период года появляется обледенение утилизатора теплоты, и отсутствие летнего подогрева в утилизаторе теплоты.

При компоновке 2 температура низкопотенциального источника теплоты растет, соответственно, уменьшается степень сжатия в компрессоре и возрастает КПЭ.

### **Заключение**

Определены две основные схемы компоновок приточно-вытяжных установок с тепловыми насосами и утилизаторами теплоты:

компоновка 1 – компрессорно-конденсаторный агрегат расположен за теплоутилизатором в канале приточного воздуха, испаритель находится за теплоутилизатором в канале удаляемого воздуха по направлению движения воздушного потока;

компоновка 2 - компрессорно-испарительный агрегат расположен перед теплоутилизатором в канале вытяжного воздуха, конденсатор располагается за теплоутилизатором в канале приточного воздуха по направлению движения воздушного потока. Описаны режимы работы установок с указанными компоновками в холодный период года.

Установлено, что вторая компоновка имеет коэффициент преобразования энергии, равный 5,7 и превышающий значение КПЭ для первой компоновки.

### **Список цитированных источников**

1. Аверьянов, В. К. Анализ результатов моделирования одно и двухконтурного воздушного теплового насоса / В. К. Аверьянов, И. Д. Киборт, В. М. Уляшева // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 3. – С. 164–168.
2. Богуславский, Л. Д. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха / Л. Д. Богуславский [и др.]; под ред. Л. Д. Богуславского и В. И. Ливчака. – М. : Стройиздат, 1990. – 624 с.
3. Васильев, Г. П. Приточно-вытяжная вентиляционная установка с теплонасосной рекуперацией тепла вентиляционных выбросов / Г. П. Васильев [и др.] // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2012. – № 6. С. 14–21.
4. Володин, В. И. Энергетическая эффективность теплового насоса «воздух–воздух» / В. И. Володин, В. Б. Кунтыш, С. О. Филатов // Труды БГТУ. № 3. Химия и технология неорганических веществ. – 2015. – № 3 (176). – С. 145–151.
5. Gustafsson, M. Energy performance comparison of three innovative HVAC systems for renovation through dynamic simulation, / M. Gustafsson [and all] // Energy Build – 2014. – P. 512–519.
6. Дискин, М. Е. Эффективность рекуперации теплоты в системах вентиляции при температурах наружного воздуха ниже температуры опасности обмерзания / М. Е. Дискин // АВОК. – 2006. – № 4. – С. 8–11.
7. Здитовецкая, С. В. Исследование эффективности утилизации теплоты в системах приточно-вытяжной вентиляции / С. В. Здитовецкая,

- В. И. Володин // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2014. – № 2.
8. Здитовецкая, С. В. Утилизация теплоты в системе приточно-вытяжной вентиляции с использованием теплового насоса / С. В. Здитовецкая, В. И. Володин // Труды Белорусского гос. технологичю ун-та. Серия 3. Химия и технология неорганических веществ. – 2009. – № 3. – Т. 1 – С. 171-173.
9. Реев, В. Г. Расчет цикла теплового насоса при различных источниках низкопотенциального тепла в условиях Арктики Республики Саха (Якутия) / В. Г. Реев, Д. С. Г. Утум // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. – 2023. – № 2 – Т. 20 – С. 25–34. – DOI 10.25587/SVFU.2023.66.41.003.
10. Шелгинский, А. Я. Анализ применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения / А. Я. Шелгинский, И. В. Яковлев // Вестник МЭИ. Энергетика. – 2018. – № 2. – С. 42–52. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-42-52.
11. Air handling unit with an integrated heat pump. Mandik. – Mode acctss: <https://scottair.ro/wp-content/uploads/2021/05/3-Centrale-de-tratare-aer-cu-grup-de-compresor-condesator-inclus-Mandik.pdf>. Date fctss: 08.09.2023.

## РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИИ МКД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ EPANET И ANSYS

*А. А. Суворов<sup>1</sup>, Ю. А. Иванов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>аспирант, УРФУ, Екатеринбург, Россия, forshlag96@gmail.com

<sup>2</sup>доцент, к. т. н, УРФУ, Екатеринбург, Россия

### **Аннотация**

В реальной проектировочной деятельности расчет сетей естественной и гибридной вентиляции на полвека отстоит от возможностей нынешнего ПО. Это ведёт к перекопировыванию одних и тех же решений из проекта в проект с минимальными отклонениями, отбрасываются только варианты, которые совсем не сработали в уже построенных зданиях.

Проектировщики не имеют простого инструмента, который бы позволил точно и быстро находить расходы, который бы позволил играючи перебирать разные конфигурации системы в поисках наиболее эффективного. Но этот инструмент существует в природе, и далее он и будет описан.

**Ключевые слова:** расчет вентиляции, гибридная вентиляция, естественная вентиляция, многоквартирный дом, Epanet, Ansys.

## DESIGN OF MULTI-APARTMENT BUILDING VENTILATION SYSTEM VIA EPANET AND ANSYS Suvorov A. A., Ivanov Y. A.

In real-life ventilation design task (both natural n hybrid ones) it's used to use the old calculation methods not quite fulfilled the modern époque, not really using modern software abilities. The same patterns over n over go from one project to another and only the numerous and mostly negative feedback could prevent propagation of an unlucky scheme.

The designers aren't really armed with a proper tool for precise and vigor ventilation system calculation. The tool able to change the topology and properties rapidly with instant result right after the final mod. But there is such tool, and here is the description of it.

**Keywords:** ventilation design, hybrid ventilation, natural ventilation, multi-apartment building, Epanet, Ansys

### **Введение**

Еще с докомпьютерной эры оценочный расчёт воздушных и водяных сетей ведётся по так называемой «расчетной ветви». Это и вправду позволяет оценить необходимую мощность нагнетателя, но едва ли даёт полное представление о режиме работы даже в точках самой расчетной ветки.

При проектировании естественной вентиляции оценочность доходит до того, что всем воздухозаборным решеткам назначают расход порядка 50...60 м<sup>3</sup>/ч независимо от этажа и подбирают сечение шахты исходя из этих самых чисел.

Попытки состыковать расчет ВЕ с реальностью в академических трудах делались неоднократно. Из недавнего – диссертации Фатулаевой К. М. и Кривошеина М. А [1], [2].

В обоих случаях используется представление воздушного объема здания в качестве системы графов, которая затем решается либо проприетарной программой, либо через «подбор параметра» Excel-я.

Но ведь в качестве системы графов уже в нашу компьютерную эру с чрезвычайной подробностью рассчитываются режимы работы водяных сетей. ZuluHydro и WaterGEMS – надежные инструменты для моментального расчета водопроводных систем самых сложных топологий. И приспособить их бесплатный аналог Epanet для расчета сети транспорта воздуха требует всего лишь пары трюков, легких в освоении.

## 1 Расчёт системы вентиляции при помощи Epanet

запуск расчёта    графический редактор    браузер элементов

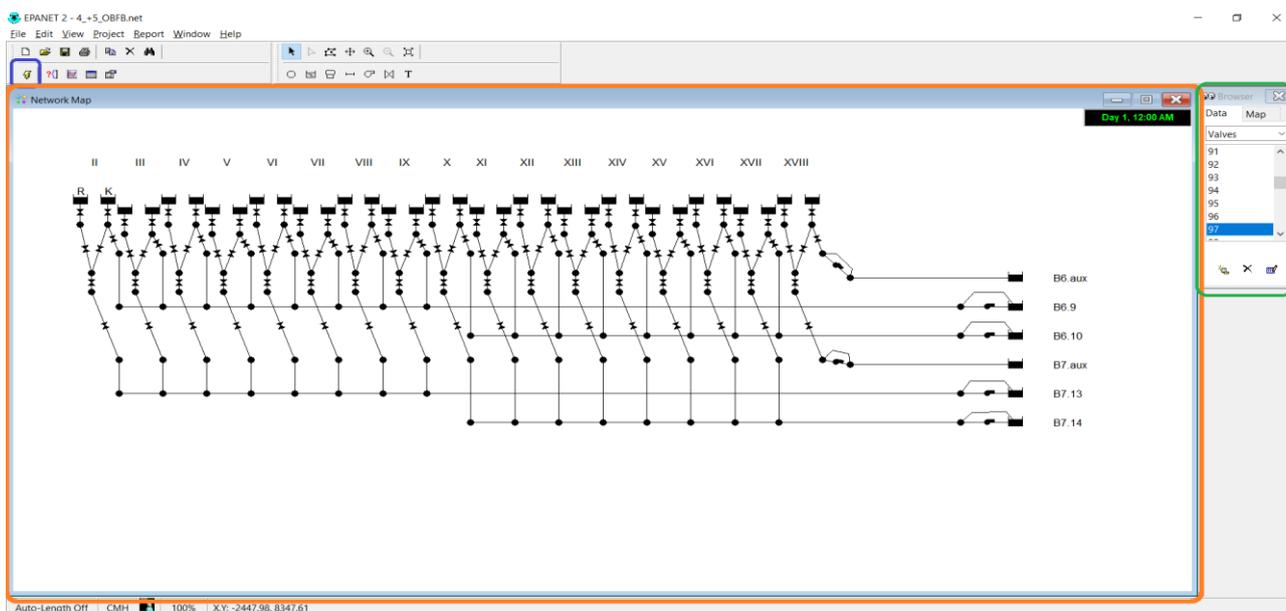


Рисунок 1 – Общий вид программы с открытым проектом вентсети

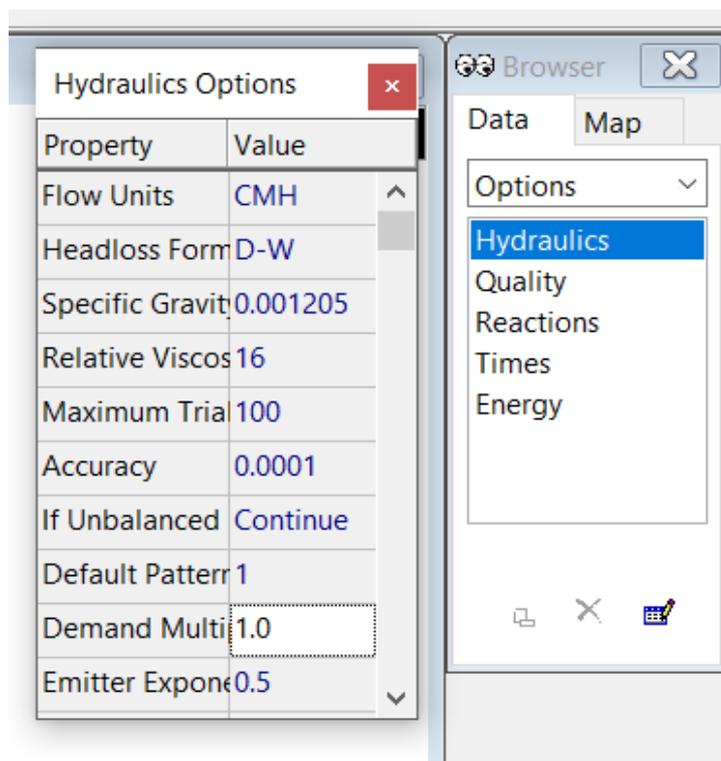
Функционал программы позволяет строить в графическом виде сеть (рисунок 1), состоящую из элементов двух родов – узлов (nodes) и соединений (links).

Произведём настройку программы для расчета транспорта воздуха с использованием удобных величин. Для этого в браузере элементов выберем Options->hydraulics и установим параметры как на рисунке.

В качестве единиц измерения взят метрический набор с измерением расхода в м<sup>3</sup>/ч.

Модель потерь давления – Дарси-Вейсбах.

Относительная плотность (относительно воды при 4 °С) и относительная кинематическая вязкость (от воды при 20 °С) задают необходимые параметры среды, в нашем случае – воздуха.

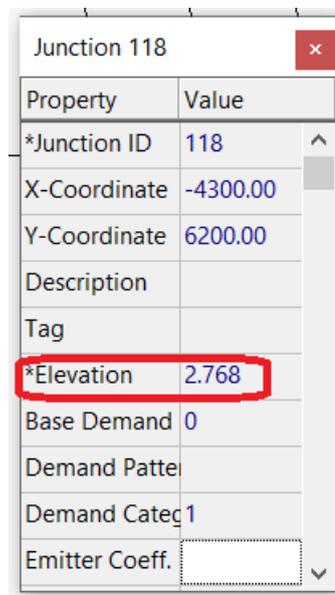
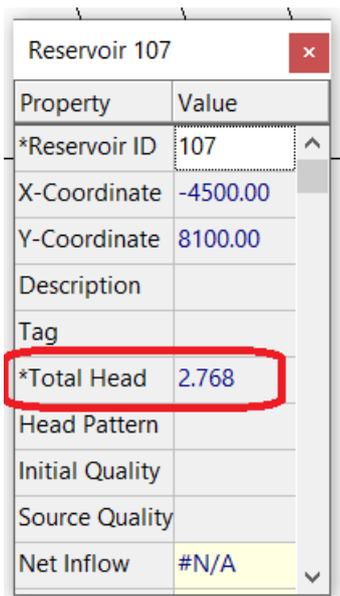


Прочие параметры можно оставить по умолчанию.

Для расчета сети воздуховодов нам потребуется составить сеть: из **резервуаров** (reservoir) – неиссякаемых (в отличие от баков) источников с заданным и в нашем случае постоянным напором (head), они представляют собой воздух после устья вытяжной шахты и перед входом в квартиру.

При необходимости можно задавать изменение давления через назначение соответствующего head pattern-a; **простых узлов** (junction), отвечающих за состояние воздуха на пересечении потоков и служащих для сегментирования участков. Для них задается

геометрическая отметка (о ее расчете будет рассказано позже), а отбор (base demand) равен нулю (по умолчанию);



Property	Value
*Pipe ID	42
*Start Node	44
*End Node	45
Description	
Tag	
*Length	3.05
*Diameter	259
*Roughness	2
Loss Coeff.	1.2
Initial Status	Open

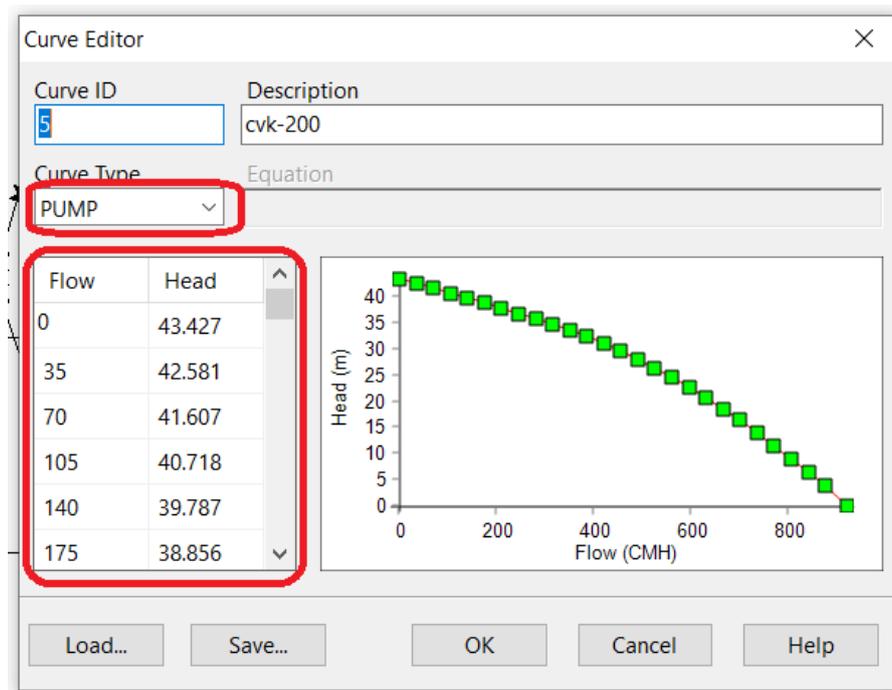
**для участков воздуховодов используем объект «pipe»** (труба), которому назначаем длину [м], диаметр [мм], шероховатость [мм], и сумму КМС.

При заданном сечении диаметр задается как для круга равной площади, а **не** через эквивалентный диаметр.

Для быстрого изменения топологии можно соединять узлы сразу несколькими трубами, оставляя включенной только нужную (initial status-> open/closed);

**вентиляторы задаются как насос (pump)** с указанием ID характеристики, которая создается в browser->curves->add;

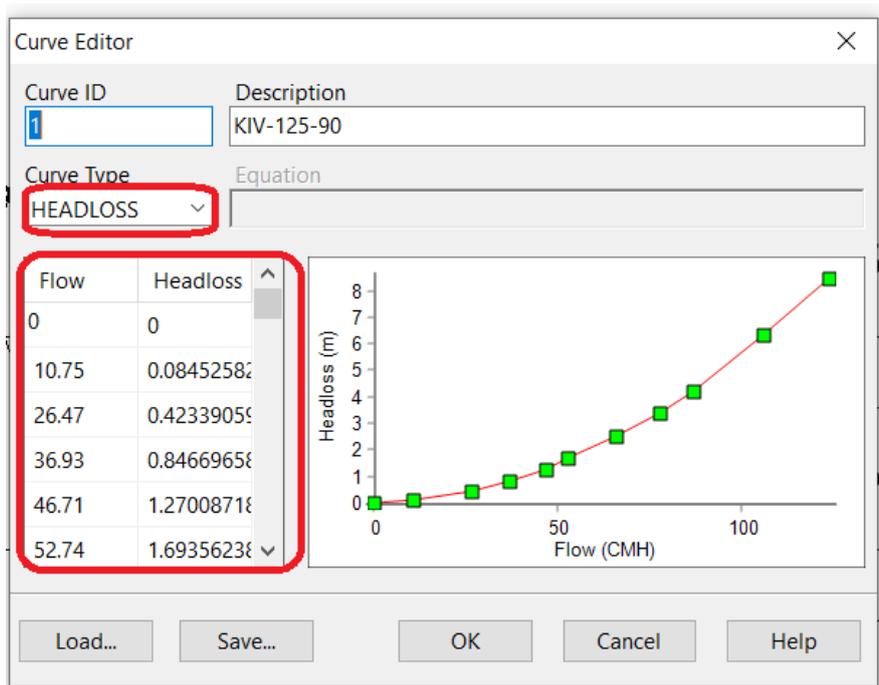
Property	Value
*Pump ID	48
*Start Node	48
*End Node	50
Description	
Tag	
Pump Curve	5
Power	
Speed	
Pattern	
Initial Status	Open



**сопротивления с известной P-L зависимостью создаются через объект GPV-valve** (клапан общего назначения), которому надо назначить номер кривой потерь давления.

Она в свою очередь задаётся аналогично кривой вентилятора.

Диаметр не важен.



Property	Value
*Valve ID	97
*Start Node	71
*End Node	83
Description	
Tag	
*Diameter	12
*Type	GPV
*Setting	1
Loss Coeff.	0
Fixed Status	None

Правила построения графа просты:

- воздух улицы после выброса шахты – резервуар с напором 0;
- воздух улицы напротив окна конкретного этажа – резервуар с напором, равным тяге (архимедовой силе) на этом этаже. Можно добавить ветровое давление;
- если просчитывается только сама шахта, то резервуар с нужным напором перед участком, отвечающим за вход воздуха в шахту;
- вентилятор направлен по ходу воздуха (иначе он закроется).

Теперь о давлениях и отметках. Программа считает в единицах напора, т. е. в метрах столба среды. Т. к. в основном, в вытяжной системе движется условно теплый воздух, а не уличный, то и приводится все к его плотности.

Например, если располагаемое давление на конкретном этаже равно 30 Па, то резервуар напротив окна этого этажа будет иметь напор  $30 / (\rho_{int} \cdot g)$ .

В случае 20 °С внутреннего воздуха  $30 / (1.205 \cdot 9.81) = 2.537$  м.

Геометрические отметки для ввода в программу находятся следующим образом:

$E_{Elevation} = H_{reversed} \left( \frac{\rho_{ext}}{\rho_{int}} - 1 \right)$ , м, где  $H_{reversed}$  – отметка, отсчитанная до точки вниз от устья вытяжной шахты.

Для примера рассмотрим расчет ВЕ (рисунок 2) трехэтажного дома с различной конфигурацией входов воздуха:

Первый этаж представляет собой «упрощенную» модель входа, второй – «простейшую», третий – «подробную».

Расставлены отметки, прямые и обратные, температуры (и плотности воздуха), указаны сечения шахты.

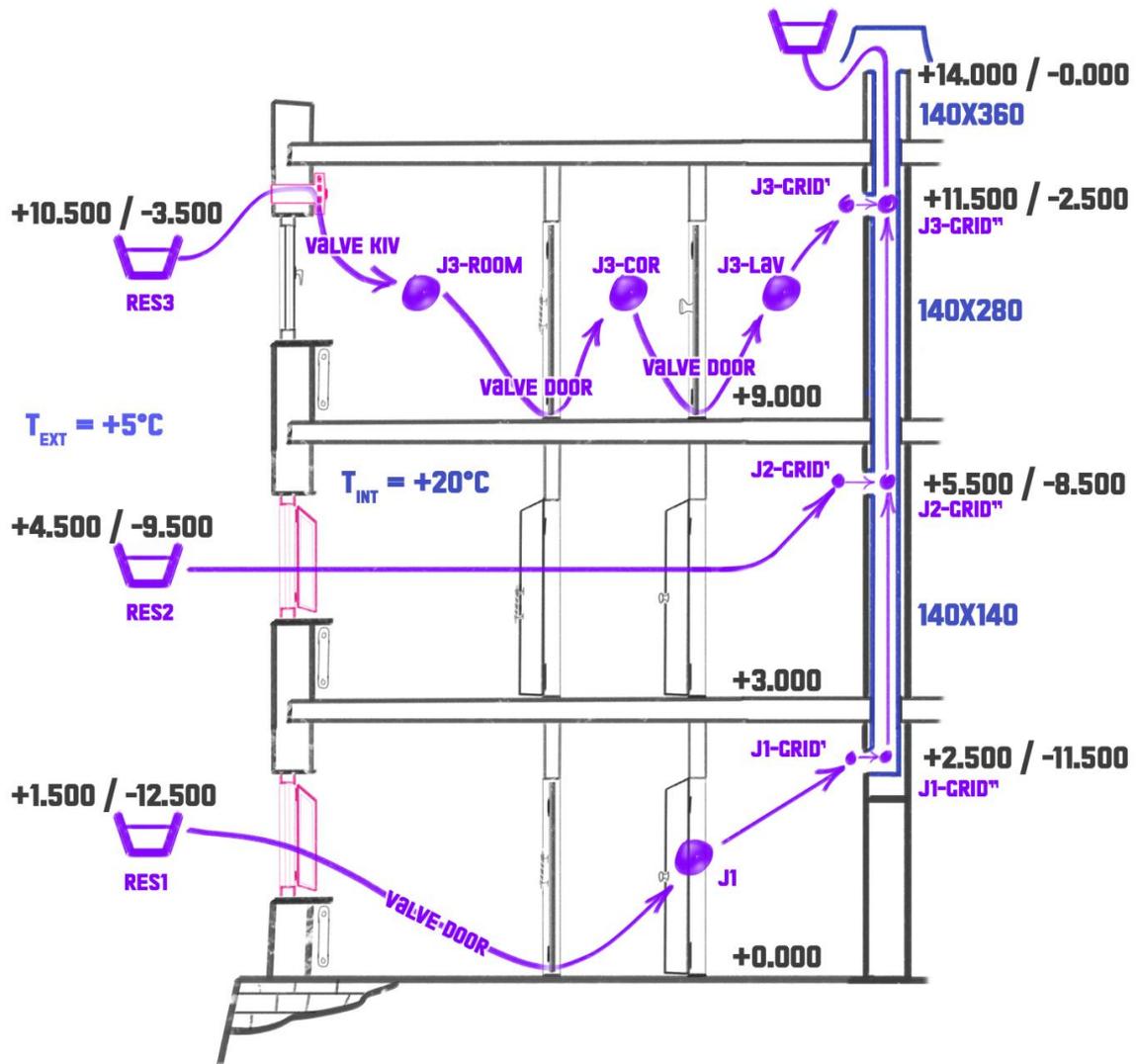


Рисунок 2 – Расчетная схема демонстрационной ВЕ

Теперь определимся с располагаемыми давлениями. На воздух в середине каждого этажа действует выталкивающая сила, пропорциональная вертикальному расстоянию до устья вытяжной шахты:

$$P_{grav} = (\rho_{ext} - \rho_{int})gH_{reversed}$$

Тогда давление для первого этажа при данных температурах составит:

$$P_{grav1} = (1.270 - 1.205) \cdot 9.81 \cdot 12.500 = 7.971 \text{ Па.}$$

Напор, выраженный в метрах столба внутреннего воздуха соответственно:

$$H_{grav1} = P_{grav1} / g\rho_{int} = 7.971 / (9.81 \cdot 1.205) = 0.674 \text{ м возд ст.}$$

Геометрическое превышение узла J1-grid'', отвечающего за воздух сразу после вытяжной решетки, будет:

$$Elevation_{J1-grid''} = 11.500 \left( \frac{1.270}{1.205} - 1 \right) = 0.620 \text{ м.}$$

И подобным образом находим прочие превышения и напоры. Шахта состоит из трех участков типа «pipe» с известными длинами и легко находимыми КМСами. Переток под дверью, вход в шахту и проход через приточный клапан – это объекты типа «GPV-valve» с заданной P-L (см. пункт 2). Участки неестественного тока воздуха (напр. RES2 – J2-grid') полагаются не имеющими сопротивления, для определенности задаются длиной 1 м и диаметром 1000 мм.

В итоге в среде Eranet получается такая система (с уже рассчитанными расходами, подписанными заданными свойствами узлов и соединений):

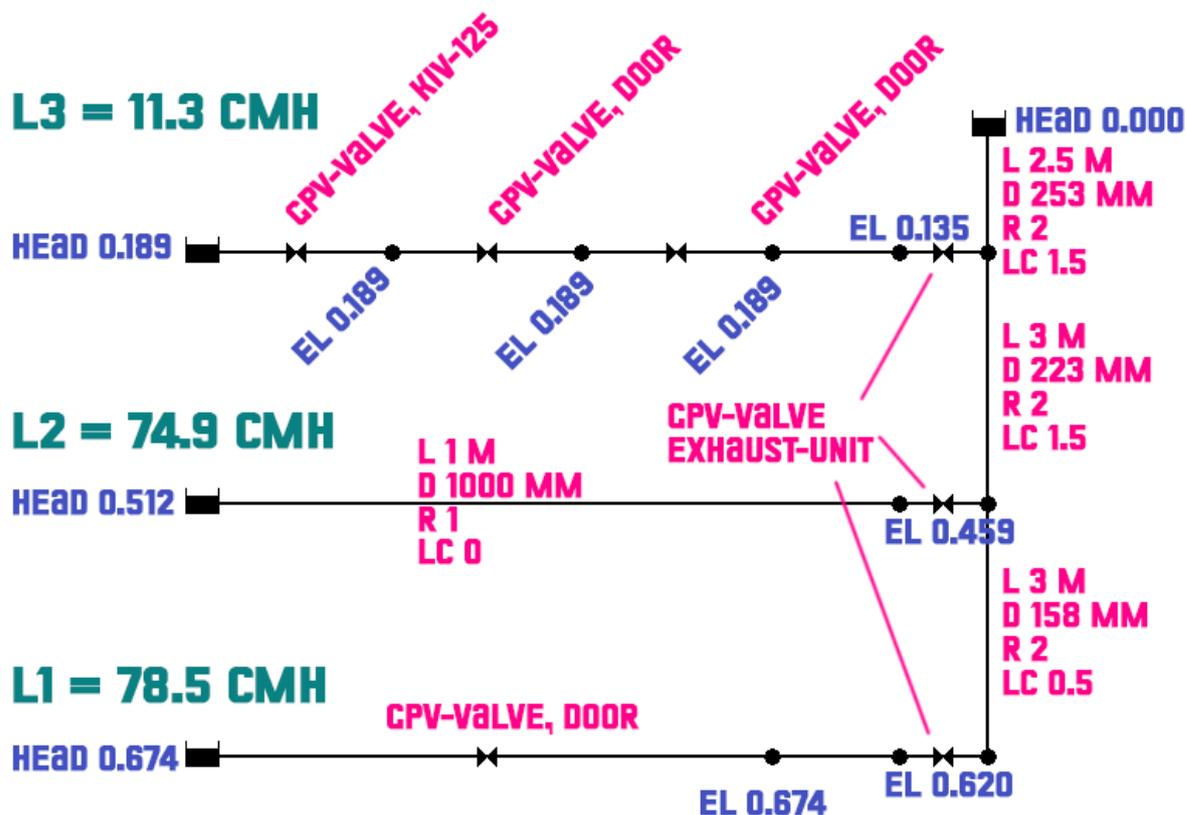


Рисунок 3 – Карта сети в Eranet с подписанными свойствами элементов

Такой метод позволяет рассчитывать системы естественной, механической и гибридной вентиляции любой сложности (однушка 18-этажки с рисунка 1 – далеко не предел). Притом ответ рассчитывается моментально, как только система нарисована и все необходимые свойства назначены.

Из функциональных минусов надо отметить отсутствие удобного импорта данных из Excel – либо надо делать свой скрипт, либо исполнять фокусы с find-n-replace в импортно-экспортном inp-файле самой программы.

Подход был в базе своей разработан Некрасовым А. В. (УРФУ ИСиА, каф. гидравлики) для расчёта именно аэродинамики вытяжных шахт. Добавление имитации тока воздуха от окна до шахты через объекты с заданной P-L – это уже моя задумка, которая будет расписана в следующем пункте.

## 2 Моделирование элементов сети в Ansys

Целое работает иначе, чем сумма частных, поэтому замена «узких» мест, встречаемых воздухом на своем пути по квартире на эквивалентные по площади каналы, скорее нелегитимна.

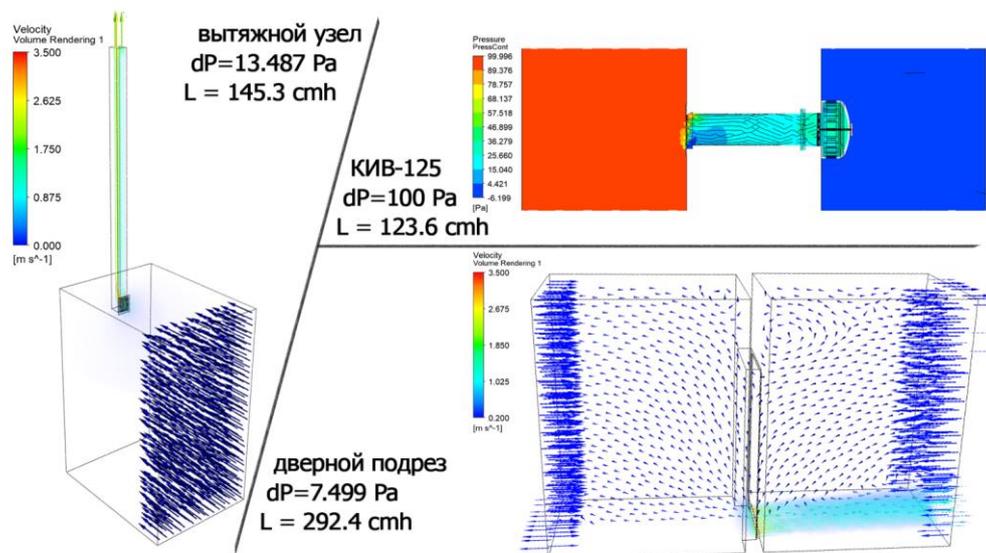
**Таблица 1** – Результаты продувки в Ansys и их квадратичная аппроксимация

КИВ открытый		вытяжной узел		дверной подрез	
Pa	СМН	Pa	СМН	Pa	СМН
0	0	0	0	0	0
0.999	10.75	0.001289	0.830	0.099	33.664
5.004	26.47	0.0135	4.151	0.499	75.444
10.007	36.93	0.096	12.449	1.000	107.497
15.011	46.71	0.267	20.753	1.499	130.816
20.016	52.74	1.082	41.507	1.999	150.915
30.029	65.91	2.457	62.259	2.999	185.027
40.036	77.48	4.396	83.013	3.990	214.436
50.047	86.83	8.649	116.225	4.999	238.473
75.063	105.93	13.487	145.268	7.499	292.419
100.100	123.61	17.585	166.019	9.981	334.425
<b><math>dP=aL^2+bL+c</math> ; <math>dP</math> [Па], <math>L</math> [м<sup>3</sup>/ч], legitimately после 2 м<sup>3</sup>/ч</b>					
a	0.0063		0.00061		0.00009
b	0.0401		0.001		-0.0008
c	0.1232		0		0.0236

А интересуют нас три узких момента – это вход воздуха в квартиру, переток под дверь, вылет воздуха в шахту. Для определенности возьмем:

- приточный клапан КИВ-125 с камерой стат. давления перед и после;
- подрез 90 x 3 см (1,5 см подрез и еще на 1,5 набегает остальные три более плотных грани двери) с комнатой перед и после;
- вытяжную решетку 150x200 с комнатой перед ней и участком шахты после.

Надо отметить, что открытые окна и двери можно полагать не имеющими сопротивления, а незарешеченное вытяжное отверстие – это канал с определенным сечением и КМС входа в канал. Т. е. необходимый и достаточный набор внутренних, квартирных сопротивлений представлен, теперь осталось продуть их в Ansys fluid и составить P-L характеристику (таблица 1) которая и использовалась ранее в пункте 1.



**Рисунок 4 – Продутые модели узлов**

### **3 Верификация комбинированного моделирования**

Теперь, имея на руках сопротивления соединений между узлами улицы, межкомнат и перед пространством вытяжной шахты, возвращаемся в Eranet и строим там маленькую модельку однокомнатной квартирki – ту, что еще можно проверить в Ansys-е. Интересует именно верификация движения воздуха по квартире, в шахте уверенность полная.

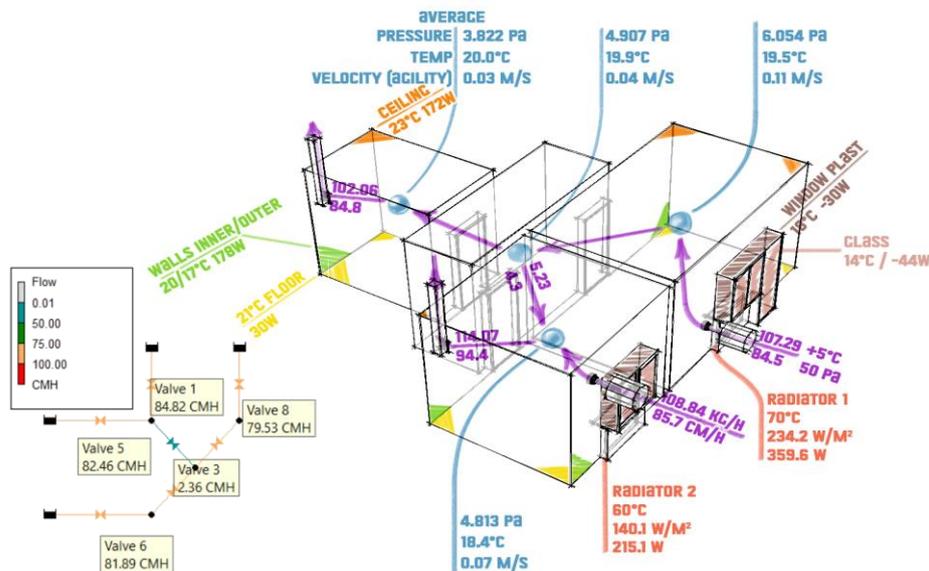
В квартире есть два входа – в комнате и в кухне, и два выхода – в кухне и санузле. Проверим два варианта – симметричный и ассиметричный с одинаковыми и разными давлениями на входах.

Симуляция в Ansys-е проводится с также подробными тепловыми граничными условиями, представление о которых (и о результате симметричного расчета) вы можете получить из следующего изображения:

Из таблиц сравнения результатов (таблицы 2 и 3) видно, что погрешности минимальны, несмотря на в корне иной метод расчета.

#### **Заключение**

В представленной здесь методике расчета используются две программы: Eranet и Excel для основных и вспомогательных вычислений соответственно. Обе устойчивы к ошибкам, обе дают понять, если что-то идет очень сильно не так, в обеих программах можно визуально найти выбивающийся из ряда параметр и перепроверить конкретно его.



**Рисунок 5** – Модель однушки в Ansys-е и Epanet-е с результатами «симметричного» эксперимента

**Таблица 2** – Результаты моделирования «симметричного» случая

ПОТОК	давл., Па	темп., °C	расход, м³/ч			расход, %		
			Ansys	Epanet	Epanet · (ρ <sub>+5</sub> /ρ <sub>+20</sub> )*			
ВХОД	комната	50	5	84.5	81.9	49.6	49.8	
	кухня	50	5	85.7	82.5	50.4	50.2	
ВЫХОД	кухня	0	19.1	94.4	84.9	89.4	52.7	51.6
	санузел	0	20.2	84.8	79.5	83.8	47.3	48.3
воздухообмен	по входу			170.2	164.4	Δ=3.5%		
	по выходу			179.2	164.4	173.2	Δ=9.0 %   3.5 %	

\*учёт теплового расширения приточного воздуха по пути до вытяжки

**Таблица 3** – Результаты моделирования «ассимметричного случая»

ПОТОК	давл., Па	темп., °C	расход, м³/ч			расход, %		
			Ansys	Epanet	Epanet · (ρ <sub>+5</sub> /ρ <sub>+20</sub> )*			
ВХОД	комната	2	5	13.7	13.3	30.7	30.8	
	кухня	7	5	30.9	29.9	69.3	69.2	
ВЫХОД	кухня	0	20.2	25.7	22.7	23.9	54.7	52.5
	санузел	0	20.3	21.3	20.5	21.6	45.3	47.5
воздухообмен	по входу			44.6	43.2	Δ=3.2%		
	по выходу			47.0	43.2	45.5	Δ=8.8 %   3.3 %	

Такой роскоши не может предоставить ни ручной расчет по Дарси-Вейсбаху, ни проприетарное ПО для решений систем уравнений, ни инструмент «подбор параметра» в Excel.

Область применения не ограничена только гибридной или естественной вентиляцией, но включает и системы с механическим побуждением. Использование в расчёте элементов с рассчитанной или заранее известной P-L кривой позволяет рассчитывать системы, состоящие не только из стандартных аэродинамических сопротивлений, но и вообще из любых.

**Благодарность** Некрасову Александру Васильевичу, к. т. н, доценту кафедры Гидравлики ИСиА УРФУ за базовую методику расчета.

### **Список цитированных источников**

1. Фатуллаева, Каминат Мурадовна Совершенствование систем естественной и гибридной вентиляции многоэтажных жилых зданий / К. М. Фатуллаева // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва : 2021.
2. Кривошеин, Михаил Александрович Совершенствование систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами на основе расчета воздушного режима / М. А. Кривошеин // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – Санкт-Петербург : 2019.
3. Материалы, использованные в статье [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://disk.yandex.ru/d/nHKXQ0FNII6gQg>.

## К ВОПРОСУ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ОТОПЛЕНИЕ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

*Н. В. Черноиван<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Доцент кафедры прикладной механики, БрГТУ, Брест, Беларусь,  
chernoivan@inbox.ru

### **Аннотация.**

Представлены результаты выполненных натурных исследований технического состояния наружных стен эксплуатируемых кирпичных жилых зданий, утепленных методом «легкая штукатурная система с применением беспрессового полистирольного пенопласта и минераловатных плит».

Исследования с помощью тепловизора показали, что после восьми лет эксплуатации фактическое (зафиксированное) значение сопротивления теплопередаче наружных стен снизилось по сравнению с проектной документацией более чем на 30 % (плитный пенополистирол) и почти на 15 % при применении минераловатных плит.

Анализ лабораторных исследований образцов строительных материалов, взятых при натурных исследованиях, позволил установить, что основной причиной снижения теплотехнических характеристик утепленных наружных стен является существенное увлажнение материалов, составляющих конструкцию стены. Основываясь на результатах исследований Б. Ф. Васильева сделан вывод, что для предотвращения увлажнения материалов в процессе эксплуатации жилых зданий необходимо, чтобы сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции в целом не превышало  $4,2 \text{ м}^2 \times \text{ч} \times \text{Па/мг}$ .

По результатам выполненных исследований для обеспечения эффективного потребления тепловой энергии на отопление жилых зданий, подключенных к сетям центрального отопления, рекомендовано применять комплексный подход: утепление фасадов и эксплуатацию системы поквартирного учета и регулирования тепла.

**Ключевые слова:** легкая штукатурная система, сопротивление паропроницанию, теплосчетчик, распределители тепла, система поквартирного учета и регулирования тепла.

## ON THE ISSUE OF RATIONAL USE OF THERMAL ENERGY FOR HEATING RESIDENTIAL BUILDINGS

*Nikolay V. CHERNOIVAN<sup>1</sup>*

### **Abstract**

The results of full-scale studies of the technical condition of the external walls of the operated brick residential buildings, insulated by the light plaster system method with the use of pressure-free polystyrene foam and mineral wool slabs, are presented.

Studies using a thermal imager have shown that after eight years of operation, the actual (fixed) value of the heat transfer resistance of the exterior walls decreased by more than 30 % compared to the design documentation (expanded polystyrene) and by almost 15 % when using mineral wool slabs.

The analysis of laboratory studies of samples of building materials taken during field studies allowed us to establish that the main reason for the decrease in the thermal characteristics of insulated exterior walls is a significant moistening of the materials that make up the wall structure. Based on the results of B. F. Vasiliev's research, it is concluded that in order to prevent the moistening of materials during the operation of residential buildings, it is necessary that the vapor permeability resistance of the enclosing structure as a whole does not exceed  $4,2 \text{ m}^2 \times \text{h} \times \text{Pa}/\text{mg}$ .

According to the results of the studies carried out, it is recommended to use an integrated approach to ensure efficient consumption of thermal energy for heating residential buildings connected to central heating networks: facade insulation and operation of a system of apartment-by-apartment accounting and heat regulation.

**Keywords:** light plaster system, vapor permeability resistance, heat meter, heat distributors, apartment-by-apartment heat metering and regulation system.

## **Введение**

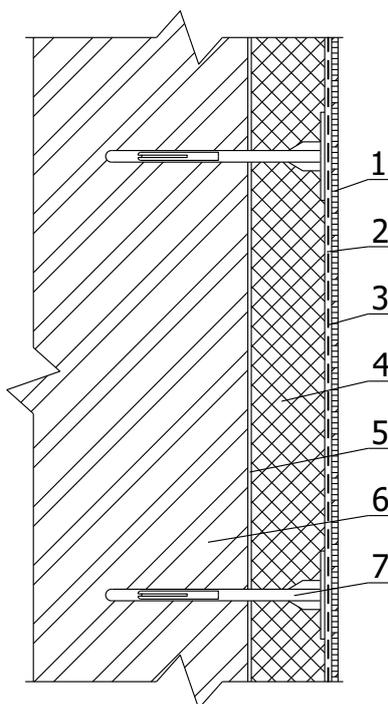
Жилищный сектор Республики Беларусь потребляет до 35 % энергоресурсов страны. Более 75 % жилищного фонда построено до 1995 года, когда показатели теплозащиты оболочки зданий были значительно ниже существующих. Показатели удельного потребления энергии на отопление зданий, построенных до 1995 года, в 3 и более раз выше, чем у зданий, строящихся в настоящее время [1].

В последние десятилетия в Республике Беларусь большое внимание уделяется проблемам энергосбережения и снижения потребления тепла при эксплуатации жилых зданий. Существенно ужесточены требования к теплотехническим характеристикам ограждающих конструкций. Проведена определенная модернизация инженерного оборудования. Практически все тепловые пункты домов оборудованы приборами учета и регулирования потребления тепловой энергии.

До настоящего времени одним из решающих факторов при выборе конструктивного решения ограждающих конструкций и инженерного оборудования проектируемого здания являлась стоимость проектирования и строительства. Однако, для владельца помещений не менее важным является стоимость его эксплуатации. По этой причине эффективность проектирования здания целесообразно оценивать суммарной стоимостью затрат на проектирование, строительство, последующую эксплуатацию и снос здания [1].

С 1995 года после развала СССР в Беларуси ведется поиск решения проблемы эффективного использования энергетических ресурсов на отопление жилых зданий.

Энергетическая эксплуатационная эффективность ограждающих конструкций зданий и сооружения, как правило, оценивается сопротивлением теплопередаче. Считается, чем оно больше, тем теплозащитная оболочка эффективней. 17 января 2003 года было принято постановление Совета Министров Республики Беларусь № 45 «О мерах по повышению эффективности эксплуатации жилищного фонда, объектов коммунального и социально-культурного назначения и защите прав потребителей коммунальных услуг», которое предусматривало выполнение тепловой модернизации (утепление): в период с 2007 по 2015 гг. 1675 домов общей площадью 6 млн 365 тыс. м<sup>2</sup>. Для решения этой задачи широко использовалась легкая штукатурная система («Термошуба») (рисунок 1) [5].



*1 – декоративно-защитный слой; 2 – армирующий слой; 3 – армирующий материал; 4 – теплоизоляционный слой; 5 – клеевой слой; 6 – утепляемая стена; 7 – дюбель-анкер для крепления плит утепления*

**Рисунок 1** – Конструктивное решение легкой штукатурной системы

Стоимость 1 м<sup>2</sup> такой системы утепления в зависимости от применяемого плитного утеплителя составляла 25–32 USD. Учитывая, что на рынке теплоизоляционных строительных материалов в Республике Беларусь на тот период стоимость 1 м<sup>3</sup> беспрепессового плитного полистирольного пенопласта была почти в 1,5 раза ниже стоимости волокнистых минераловатных плитных утеплителей, стройэкспертиза настойчиво рекомендовала заказчикам закладывать в проектно-сметную документацию дешевый отечественный плитный беспрепессовый пенополистирольный пенопласт марки ПСБС-25.

На сегодня в открытой печати статистические данные о полученной в стране экономии энергии на отопление зданий по результатам выполнения постановле-

ния Совета Министров РБ № 45 от 17.01.2003 не опубликованы. Анализ результатов выполненной работы по тепловой реабилитации эксплуатируемых жилых зданий не озвучен.

### **Натурные исследования эксплуатационной эффективности утепленного стенового ограждения жилых зданий**

Анализ результатов натурных исследований кирпичных жилых зданий с утепленными наружными стенами (*плитный пенополистирол, минераловатные плиты*) с фактическим сопротивлением теплопередаче близким к  $2,5 \text{ м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт}$  показал, что после 8–10 лет эксплуатации весовая влажность материалов кирпичной кладки утепленных стен существенно увеличилась [6]. Зафиксированная максимальная влажность керамического полнотелого кирпича приближалась к 11 %, что более чем в 5 раз выше определенной нормативными документами. Плитный утеплитель (беспрессовый пенополистирольный пенопласт) увлажнился почти до 21 %, что более чем в 2 раз выше нормативного значения [2]. Фактическое (зафиксированное) значение сопротивления теплопередаче наружных стен снизилось более чем на 30 % по сравнению со значениями, установленными проектной документацией.

Выполненные лабораторные исследования проб материалов, взятых из кирпичных стен жилых зданий, утепленных плитами минераловатными «ISOVER» (изготовлены в Республике Польша) показали, что фактическая величина весовой влажности составляет [6]:

- минераловатные плиты – 1...2,8 %;
- кирпич керамический полнотелый – 3,9...6 %.

Фактическое (зафиксированное) значение сопротивления теплопередаче наружных стен, эксплуатируемых 8–10 лет снизилось не более чем на 15 % по сравнению с заложенными в проектной документации

Очевидно, что основной причиной существенного снижения теплотехнических характеристик утепленных стен в процессе их эксплуатации, является увлажнение материалов, составляющих конструкцию стены.

**Обсуждение полученных результатов.** Основываясь на исследованиях, выполненных Б. Ф. Васильевым [4], можно сделать предварительный вывод, что основной причиной столь существенного увлажнения конструктивных слоев утепленных стен является постоянное накопление влаги в наружном ограждении за счет поступления в него пара из воздуха эксплуатируемых помещений. Накопление влаги в утепленных стенах за относительно короткий период эксплуатации утепленного фасада, очевидно, обусловлено следующим:

– значительной разностью парциальных давлений водяного пара, содержащегося в воздухе помещений и в наружном воздухе в зимнее время (отсутствие вентиляции и наличие стеклопакетов). Этот процесс активизируется с увеличением разности температур внутреннего и наружного воздуха, что препятствует выходу влаги из стены наружу в теплое время года (просушивание конструкции).

Основным фактором, влияющим на интенсивность процесса увлажнения материалов, составляющих утепленное наружное кирпичное стеновое ограждение, является величина сопротивления паропрооницанию ( $R_n$ ) конструкции стены в целом. Чем его значение выше, тем быстрее происходит увлажнение материалов.

Следовательно, при проектировании утепленных стен необходимо применять теплоизоляционные материалы, позволяющие обеспечить минимальное сопротивление паропрооницанию конструкции стены в целом.

Примечание: сопротивление паропрооницанию не утепленных наружных кирпичных стен толщиной 510 мм в зависимости от конструктивного решения (материала и толщины наружной и внутренней версты кладки) находится в пределах  $R_{n \text{ клад}} = 3,5 \dots 4,2 \text{ м}^2 \times \text{ч} \times \text{Па/мг}$  [6], что позволяет обеспечить влажность воздуха в жилых помещениях с оконным заполнением из двухстворчатых деревянных рам согласно требованиям санитарных норм без устройства механической вентиляции.

**Мероприятия, позволяющие снизить потребление тепла на отопление жилых зданий.** Исследования, выполненные В. Г. Гагариным [7, 8], показали, что повышение энергетической эффективности жилых зданий, подключенных к сетям центрального отопления, только за счет увеличения толщины слоя плитного утеплителя является дорогостоящим решением, которое не окупается за период эксплуатации такого здания. Основными причинами этого являются:

- высокая сметная стоимость производства работ по утеплению фасадов;
- дополнительные материальные и финансовые затраты на устройство и эксплуатацию системы принудительной вентиляции (рекуперации) для удаления избыточной влаги из помещений.

Следует отметить, что для собственников жилья в Республике Беларусь, проживающих в зданиях, подключенных к сетям центрального отопления, при существующих тарифах на отопление (21,93 руб./Гкал на 31.05.23), что почти в пять раз ниже фактических затрат на отопление, не будет интереса вкладывать собственные денежные средства в тепловую модернизацию.

Очевидно, что только оплата за отопление по тарифам без государственных дотаций может стать стимулом воспитания у квартиросъемщика чувства собственника.

Существующая на сегодня в Республике Беларусь нормативная база и организационно-технические мероприятия, не стимулируют владельцев жилья, построенного по нормативам до 1995 года, решить проблему повышения энергоэффективности эксплуатируемых жилых зданий только за счет их тепловой модернизации. В связи с этим рекомендуется задачу рационального использования (а не экономии) тепловой энергии на отопление жилого фонда решать комплексно, т. е. наряду с утеплением фасадов зданий использовать систему поквартирного учета и регулирования тепла. Основными преимуществами этой системы является ее автономность. Каждый собственник помещений, подключенных к сетям центрального отопления, имеет возможность самостоятельно контролировать количество потребленного им тепла, а также самостоятельно (на свое усмотрение) с помощью термостатического регулятора обеспечивать комфортную с его точки зрения температуру

воздуха в каждом помещении (на каждом радиаторе) в любое время суток, на любой промежуток времени.

На сегодня в Белоруссии имеется все необходимое оборудование для устройства поквартирного учета и регулирования тепла.

В основном применяются следующие типы теплосчетчиков:

– «Сенсоник», производство Республики Беларусь (один из самых дешевых теплосчетчиков в РБ);

– «Ф-прибор» Т 230 (ультразвуковой), производство Республики Беларусь.

Теплосчетчики легко крепятся на любые типы отопительных приборов.

Также, как более экономный для собственников жилых помещений вариант, можно применять распределители тепла, которые устанавливаются на радиаторы отопления. В Беларуси в основном применяются распределитель тепла «Допримо». С 1 января 2011 г. в Республике Беларусь начато производство распределителя тепла «Допримо 3 радио», который позволяет снимать показания не заходя в квартиру, что является дополнительным удобством для жильцов.

Как показала практика, срок окупаемости установки приборов в России (при существующих тарифах на отопление) составляет 3 года при сроке службы терморегулятора 30 лет и распределителя тепла 10 лет.

В европейских странах в последние 15 лет система поквартирного учета и регулирования тепла является основным резервом рационального потребления тепла на отопление.

**Заключение.** Изменение (потепление) климата на Земле привело к тому, что продолжительность отопительного сезона для всех областей Республики Беларусь снизилась с 4,7 % (Витебская обл.) до 6 % (Брестская обл.). Средняя температура наружного воздуха за отопительный период по Беларуси в среднем повысилась почти на 0,8 °С [3]. Очевидно, что эти изменения климата необходимо учитывать при проектировании систем утепления наружных стен. Сокращение продолжительности отопительного сезона в Республике Беларусь, обусловило, что достаточно продолжительный период времени системы центрального отопления в отопительный период работают в режиме «протапливания». (температура подаваемого теплоносителя существенно ниже нормативной). Такой тепловой режим работы системы центрального отопления позволил за последние 5 лет снизить расход тепловой энергии в Брестской и Гродненской областях на отопление почти на 4 %.

Исходя из вышеизложенного можно сделать следующее заключение.

Для обеспечения рационального использования тепловой энергии на отопление жилых зданий, подключенных к сетям центрального отопления, рекомендуется применять комплексный подход: эффективное утепление фасадов и эксплуатацию системы поквартирного учета и регулирования тепла.

Для повышения эксплуатационной эффективности утепления фасадов зданий рекомендуется при проектировании дополнительной теплоизоляции наружных стен сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции в целом принимать не выше нормативного сопротивления паропрооницанию. Такое кон-

структивное решение позволяет без дополнительных материальных и финансовых затрат на устройство механической вентиляции (рекуперации) обеспечить влажность воздуха в жилых помещениях в пределах, определенных требованиями действующих санитарных норм [9].

Как показывает практика, на сегодня система поквартирного учета и регулирования тепла является одним из наиболее эффективных технических решений, позволяющих рационально потреблять энергию на отопление. Наличие в Республике Беларусь всего необходимого оборудования для устройства поквартирного учета и регулирования тепла, простота его установки, относительно невысокая стоимость позволяют обеспечить комфортную для жильцов температуру в каждой комнате на любой период времени.

### Список цитированных источников

1. Пилипенко, В. М. Анализ рынка жилищного строительства. ПРООН/ГЭФ. Проект № 00077154 «Повышение энергетической эффективности жилых зданий в Республике Беларусь» / В. М. Пилипенко. Минск. :2018.
2. Строительная теплотехника. Строительные правила Республики Беларусь : СП 2.04.01-2020. – Введ. 20.01.2021. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2020. – 76 с.
3. Строительная климатология : Изменение № 1 СНБ 2.04.02-2000. – Введ. 01.07.07. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2007. – 35 с.
4. Васильев, Б. Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий / Б. Ф. Васильев – М. : Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1957. – 210 с.
5. Пилипенко, В. М. К вопросу создания и эксплуатации легких штукатурных систем / В. М. Пилипенко, В. Н. Черноиван, Н. В. Черноиван // Архитектура и строительство. – 2012. – № 1. – С. 62–67.
6. Черноиван, В. Н. Техническое состояние конструктивных слоев утепленных наружных стен эксплуатируемых зданий / В. Н. Черноиван, В. Г. Новосельцев, Н. В. Черноиван // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 4. – С. 45–48.
7. Гагарин, В. Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий / В. Г. Гагарин // Строительные материалы. – 2010. – № 3. – С. 8–16.
8. Гагарин, В. Г. Экономический анализ повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий / В. Г. Гагарин // Строительные материалы. – 2008. – № 9. – С. 41–47.
9. Черноиван, В. Н. К изучению вопроса об обеспечении качественных параметров воздуха в жилых помещениях зданий, прошедших тепловую реабилитацию / В. Н. Черноиван, Н. В. Черноиван, В. А. Самкевич // Новые образовательные технологии в экологической подготовке студентов : материалы областной научно-методической конференции. – Брест, 2005. – С. 65–68.

## МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ

*Н. Н. Шешко<sup>1</sup>, Н. Н. Шпендик<sup>2</sup>, Д. А. Касперович<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Начальник научно-исследовательской части БрГТУ, Брест, Беларусь  
optimum@tut.by

<sup>2</sup>Доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции БрГТУ, Брест, Беларусь  
<sup>3</sup>студентка гр. ТГВ-19 БрГТУ, Брест, Беларусь

**Аннотация.** Представлены подходы по применению мультифизического моделирования для решения инженерных задач по определению оптимальных параметров гидравлических систем реализованные в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Численное решение мультифизической модели основано на применении метода конечных элементов.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, численные методы, метод конечных элементов, верификация.

## MULTIPHYSICS MODELING OF FINITE ELEMENT PROBLEMS OF ENGINEERING NETWORKS

*N. N. Sheshko, N. N. Shpendik, D. A. Kasperovich*

**Abstract.** The paper presents approaches to the application of multiphysics modeling for solving engineering problems in determining the optimal parameters of hydraulic systems implemented in the software package COMSOL Multiphysics. Numerical solution of multiphysics model is based on the finite element method.

**Keywords:** mathematical modeling, numerical methods, finite element method, heat and moisture transfer.

**Введение.** Физические явления, связанные с движением жидкости и газа, не всегда могут быть описаны математически с достаточной точностью. В таких случаях прибегают к экспериментальному изучению этого явления на моделях.

Моделирование — исследование объектов познания на их моделях; построение и изучение моделей реально существующих объектов, процессов или явлений с целью получения объяснений этих явлений, а также для предсказания явлений, интересующих исследователей.

Если модель и объект, на котором происходит изучаемое явление, имеют одну и ту же физическую природу, такое моделирование называется физическим.

Явление может быть исследовано и на модели иной физической природы, если они (явления и модель) описываются одинаковыми математическими зависимостями. Такое моделирование называется аналоговым.

Если известны уравнения, описывающие рассматриваемое явление, но решение их обычными методами затруднено, прибегают к решению этих уравнений

численными методами на ЭВМ. Такое моделирование называется математическим или численным.

Рассмотрим подробнее каждый из видов моделирования и определим, какой является наиболее эффективным.

**Материалы и методы.** В области, которая может быть названа «моделированием», относящимся к исследованию различных физических явлений, необходимо различать два вида моделирования:

1. Физическое моделирование — в этом случае на модели воспроизводится изучаемое явление с сохранением его физических свойств.

2. Математическое моделирование — в этом случае исследование естественных состояний или процессов выполняется путем изучения явлений, имеющих иное физическое содержание, однако описываемое теми же математическими зависимостями. К математическому моделированию следует отнести и расчеты тех или других процессов, выполняемые по специально составленным программам [1].

К теории физического моделирования прибегают при лабораторном проектировании сложных сооружений, элементов систем теплогазоснабжения, вентиляции, отопления и кондиционирования, которые вообще не поддаются с достаточной степенью точности обычному теоретическому расчету. Основой данного моделирования является теория подобия.

Физически подобными явлениями называются явления одной и той же физической природы, для которых все характерные величины подобны: в сходственных точках природы и модели и в соответственные моменты времени для подобных явлений все векторные величины должны быть геометрически подобными, все же скалярные величины — соответственно пропорциональны.

При физическом моделировании гидравлических явлений различают геометрическое, кинематическое и динамическое подобия.

Математическое моделирование процессов и явлений в различных областях науки и техники является одним из основных способов получения новых знаний и технологических решений. Математическая модель формируется в виде формулы, уравнения или системы уравнений, которые могут быть алгебраическими, дифференциальными, либо интегральными, но в любом случае описывают натуральный образец, его свойства.

Использование математических моделей позволяет проводить исследования режимов работы инженерных систем при неизмеримо меньших финансовых и материальных затратах, чем исследования на реальных объектах, на стендах или на физических моделях, поскольку эксперименты можно проводить еще и в тех случаях, когда физическая модель уже разрушается. Таким образом, уже на стадии проектирования можно найти оптимальные параметры и режимы работы инженерных систем.

Моделирование является одним из важнейших этапов проектирования любого технического объекта, в том числе и современных гидравлических систем, позволяя заменить или значительно сократить этапы наладки и натуральных испытаний.

Для моделирования используют разные программы [2]:

1. *Среда Matlab*. Программа *Simulink* является приложением к пакету *Matlab* и тесно связана с ним. *Simulink* — самостоятельный инструмент *Matlab* и при работе с ним не требуется знание самого *Matlab* и остальных его приложений.

2. *SimHydraulics в Simulink*. *SimHydraulics* — набор моделирования для инженерного проектирования и имитации гидравлических систем в *Simulink* и *Matlab*. К достоинствам моделирования гидравлических систем при помощи *SimHydraulics* в *Simulink* могут быть отнесены простота создания моделей, наглядность и высокая скорость вычислений при моделировании систем с большим числом элементов.

3. *FLOW-3D* — современный программный продукт для анализа динамики жидкости и газа, включая тепловые эффекты. Он применяется для математического моделирования ограниченных течений жидкости и течений со свободной поверхностью при турбулентном и ламинарном режимах, а также газов в дозвуковом и сверхзвуковом режимах.

4. *COMSOL Multiphysics®* унифицирует рабочий процесс решения инженерных и научных задач с помощью численных методов. Модули расширения содержат специализированные инструменты для моделирования процессов и явлений в области электродинамики и оптики, механики и акустики, гидродинамики и теплопередачи, химии и электрохимии.

*COMSOL Multiphysics* — это программное обеспечение общего назначения для моделирования, используемое во всех областях проектирования, производства и научных исследований. Программное обеспечение предоставляет возможности полностью связанного мультифизического и однофизического моделирования, управление моделями и удобные инструменты для создания приложений моделирования [3].

С помощью *COMSOL Multiphysics* можно моделировать различные сложные физические процессы. Пакет *COMSOL Multiphysics* позволяет моделировать практически все физические процессы, которые описываются частными дифференциальными уравнениями.

Удобно использовать *COMSOL Multiphysics* для решения различных задач, в том числе и задач систем инженерных сетей, так как программа имеет модули, которые описывают различные физические явления, и эти модули могут взаимодействовать между собой, обмениваясь информацией.

Точные мультифизические модели учитывают широкий диапазон возможных условий эксплуатации и физических эффектов. Это позволяет использовать модели для понимания, проектирования и оптимизации процессов и устройств для реалистичных условий эксплуатации.

В программном обеспечении *COMSOL Multiphysics* можно как создавать геометрию, так ее и импортировать. Для моделирования необходимо создание рабочей плоскости выдавливания 2D-объекта в 3D-объект.

Рабочая плоскость — это 2D-плоскость, ориентированная в любом месте 3D-пространства.

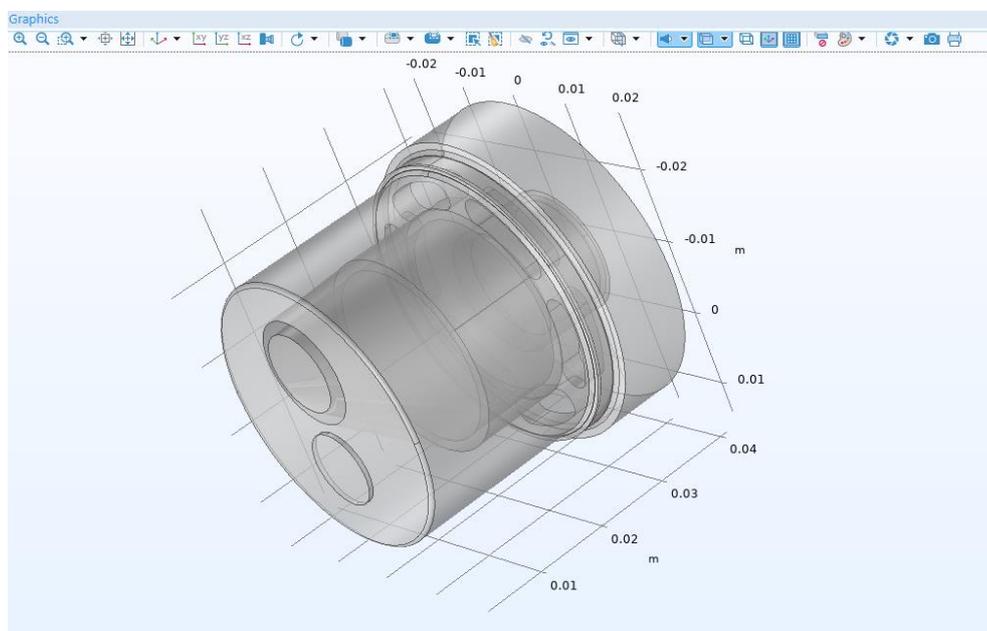
Программное обеспечение имеет различные операции, с помощью которых можно корректировать и изменять геометрию объекта.

Для моделирования задается вид моделируемого вещества, а также задаются свойства, соответствующие этому материалу: basic (базовый) и power law (сила закона). К базовым свойствам относятся теплопроводность  $k, Вт/(м \cdot К)$ , плотность  $\rho, кг/м^3$ , теплоемкость при постоянном давлении  $c_p, Дж/(кг \cdot К)$ . К свойствам силы закона относятся два параметра: коэффициент консистенции жидкости  $m_{-}row$  и индекс поведения потока  $n_{-}row$ . Помимо данных параметров необходимо задать давление, под которым находится вещество.

**Результаты и обсуждение.** Имея положительный опыт моделирования потока в открытых водотоках, авторами была предпринята попытка моделирования потока в закрытых средах в программном комплексе *COMSOL Multiphysics* [4]. Принцип работы программного обеспечения *COMSOL Multiphysics* был рассмотрен на примере моделирования фильеры, через которую проходит высоковязкая жидкость. В результате моделирования были получены результаты, с помощью которых можно оценить эффективность детали и при необходимости подобрать наилучшие параметры для повышения эффективности.

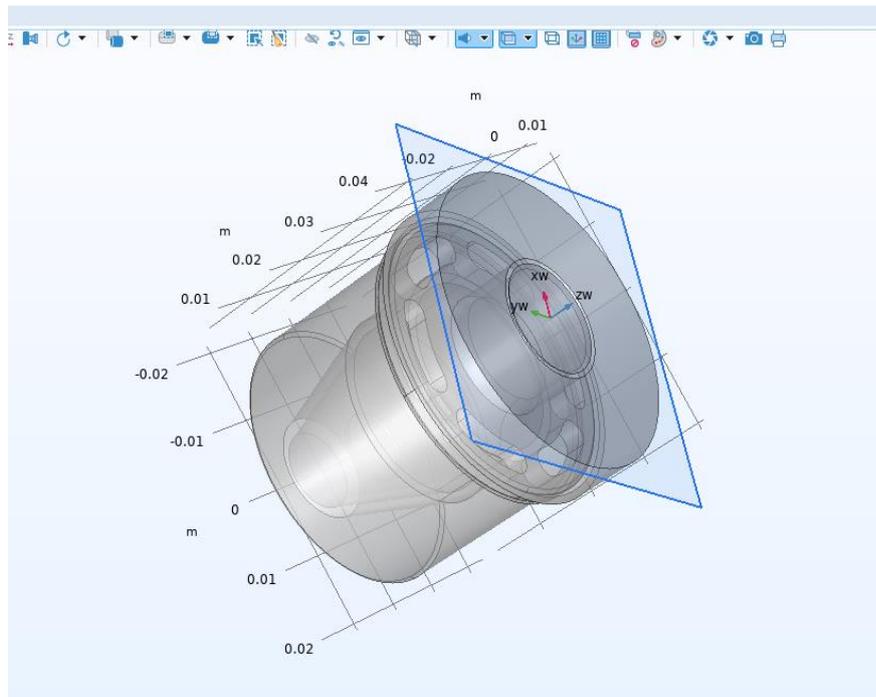
Для решения задачи мы импортируем геометрию фильеры. Данный импортируемый файл является 3D CAD file (3D файлом САПР). Объекты для импорта - твердые вещества и поверхности.

Трехмерных твердотельные объекты получены из двумерных сечений или граней путем выдавливания 2D-объекта в 3D-объект.



**Рисунок 1** – Процесс получения 3D-объекта

Для определения 2D-объектов в 3D создана рабочая плоскость (рисунок 2). Рабочая плоскость – это 2D-плоскость, ориентированная в любом месте 3D-пространства.



**Рисунок 2 – Рабочая плоскость**

Далее добавляем материал для высоковязкой жидкости, проходящей через фильеру. Данным материалом будет Pasta 30 % hydration. Зададим ей имя «mat1». Также зададим этому материалу следующие свойства: basic (базовый) и power law (сила закона). К базовым свойствам относятся теплопроводность  $k_{iso} = 0.242 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$  плотность  $\rho = 1200 \text{ кг} / \text{м}^3$ , теплоемкость при постоянном давлении  $c_p = 2000 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ . К свойствам силы закона относятся два параметра: коэффициент консистенции жидкости  $m_{pow} = m30(T) / 10 \text{ Па} \cdot \text{с}$  и индекс поведения потока  $n_{pow} = n30(T)$ . Тесто находится под давлением  $p = 2 \text{ МПа}$ .

Поскольку вязкость расплава велика, число Рейнольдса, описывающее отношение инерции к вязким силам, является низким. При малых числах Рейнольдса силы вязкости преобладают над силами инерции. Таким образом, последним можно пренебречь в уравнениях Навье-Стокса и можно использовать интерфейс Creeping Flow (ползучего потока). Ползучий поток, также называемый потоком Стокса, возникает в системах с высокой вязкостью или малыми масштабами геометрической длины (например, в микрофлюидных и МЭМС-устройствах).

Уравнения, решаемые интерфейсом Creeping Flow, представляют собой уравнения Навье-Стокса для сохранения количества движения и уравнения неразрывности для сохранения массы.

Уравнение, которым описывается движение жидкости:

$$0 = \nabla \cdot [-pl + K] + F$$

где  $p$  – давление,  $l$  – геометрических параметр,  $F$  – объемная сила.

Для интерфейсов Turbulent Flow узел Fluid Properties также добавляет уравнения для расчета переноса турбулентности.

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0$$

$$K = \mu_{app} (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu_{app} (\nabla u) l$$

$$\mu_{app} = m \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{ref}} \right)^{n-1}$$

$$\dot{\gamma} = \max(\sqrt{2S:S}, \dot{\gamma}_{min}),$$

$$S = \frac{1}{2} [\nabla u + (\nabla u)^T]$$

где  $p$  – давление,

$l$  – геометрических параметр,

$F$  – объемная сил,

$\rho$  – плотность,

$m$  – коэффициент консистенции жидкости,

$n$  – индекс поведения потока,

$\dot{\gamma}_{ref}$  обозначается эталонная скорость сдвига и  $\dot{\gamma}_{min}$  является нижним пределом скорости сдвига,

$u$  – скорость.

Высоковязкая жидкость демонстрирует истончение при сдвиге (псевдопластичность). Чтобы избежать нефизической бесконечной вязкости при нулевой скорости сдвига COMSOL, Multiphysics реализует модель степенного закона следующим образом:

$$\mu_{app} = m \left( \frac{\max(\dot{\gamma}, \dot{\gamma}_{min})}{\dot{\gamma}_{ref}} \right)$$

где  $m$  – коэффициент консистенции жидкости,

$n$  – индекс поведения потока,

$\dot{\gamma}_{ref}$  обозначается эталонная скорость сдвига и  $\dot{\gamma}_{min}$  является нижним пределом скорости сдвига.

*Узел Wall* включает в себя набор граничных условий, описывающих условия течения жидкости на неподвижных, движущихся и протекающих стенках.

Стенки фильеры являются сплошными. Отсутствие проскальзывания является граничным условием по умолчанию для моделирования сплошных стен. Непроскальзывающая стенка – это стенка, в которой скорость жидкости относительно скорости стенки равна нулю. Для неподвижной стены это означает, что  $u = 0$ .

*Узел Outlet (выход)*. Это условие следует использовать на границах, для которых существует чистый отток из домена. Вход установлен как открытая граница с граничным напряжением 6 МПа. На выходе давление установлено равным 0 Па. Температура среды равна 293,15К (45°С) Также накладываем условие «подавить обратный поток».

*Узел Fluid (жидкость)* использует следующую версию уравнения теплопроводности для моделирования теплообмена в жидкостях:

$$\rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla q = Q + Q_p + Q_{vd}$$

$$q = -k \nabla T$$

$$\rho = \frac{P_A}{R_s T} \text{ в областях идеального газа,}$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,

$c_p$  – теплоемкость жидкости при постоянном объеме,  
 $k$  – коэффициент теплопроводности жидкости,  
 $u$  – поле скорости жидкости,  
 $Q$  – источник тепла,  
 $p_A$  – абсолютное давление,  
 $R_g$  – газовая постоянная газа,  
 $T$  – температура.

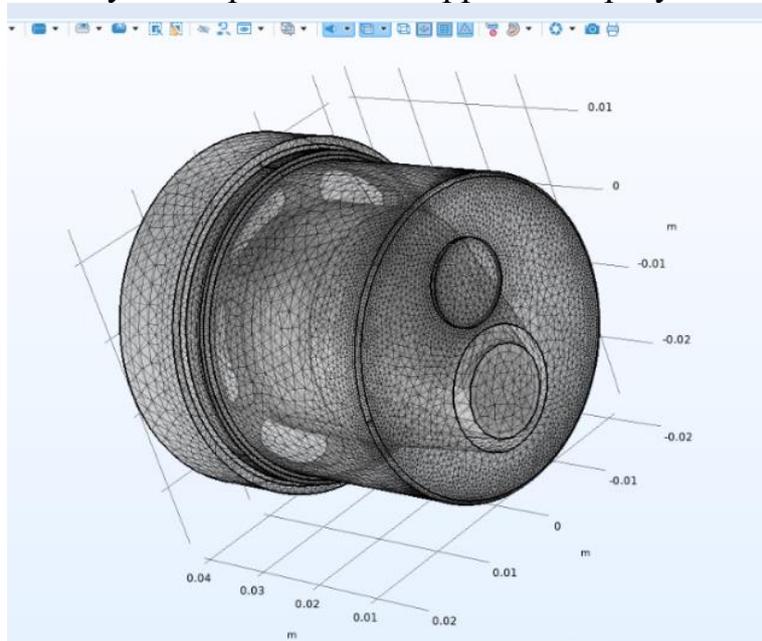
Температура моделируемого вещества равна 293,15К (20°С).

Узел *Outflow (отток)* обеспечивает подходящее граничное условие для теплопередачи с преобладанием конвекции на выходных границах. В модели с конвективным переносом тепла это условие гласит, что единственный перенос тепла через границу происходит за счет конвекции. Градиент температуры в нормальном направлении равен нулю, излучение отсутствует.

Для уравнения теплопередачи тепловой поток с коэффициентом теплопередачи равным 50 Вт / (м<sup>2</sup>·К) и наружная температура 45 °С на всех наружных стенах фильеры. На входе установлена фиксированная температура 45 °С, а на выходных границах применяются условия оттока.

Интерфейс Multiphysics объединяет две физики: *Creeping Flow (ползучий поток)* и *The Heat Transfer in Fluids (теплообмен в жидкостях)*.

Процесс численного решения инженерной или научной задачи методом конечных элементов подразумевает построение так называемой конечно-элементной сетки для разбиения геометрической модели на подобласти. Он является очень важным для получения решения и корректных результатов (рисунок 3).



**Рисунок 3** – Конечно-элементная сетка

Сетка соответствует геометрической модели геометрии компонента. Сетка работает так, что, при добавлении нового компонента в построитель моделей,

последовательность создания сетки добавляется по умолчанию в узел сетки. Когда компонент имеет более одной последовательности создания сетки, они собираются в узле сетки.

*Узел Study* содержит все узлы, которые определяют, как решать модель.

*Узел Step: Stationary (шага стационарного исследования)* соответствует стационарному решателю (по умолчанию) или параметрическому решателю.

*Узел Solver Configurations (Конфигурации решателя)*. Конфигурация решателя представлена узлом решения, в котором хранится как последовательность подузлов, определяющих способ вычисления решения, так и само решение – после того, как оно было вычислено.

**Заключение.** В результате моделирования были получены следующие параметры: площади отверстий, скорости потока на выходе из отверстий, температура и изотермические контуры. На основе полученных данных изготовили фильеры на 3D-принтере, что позволило увеличить производительность предприятия более 20 %.

Данное исследование является примером применения программного обеспечения *COMSOL Multiphysics* для решения задач инженерных сетей. Существует еще множество задач, которые можно решить с помощью моделирования: от исследований солнечного излучения, которые позволяют оптимизировать расчет затенения, чтобы уменьшить нагрузку на систему охлаждения и добиться максимальной эстетики, до влияния крепежных кронштейнов вентилируемого фасада на целостность изоляции.

#### Список цитированных источников

1. StudFiles [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studfile.net>. – Дата доступа: 08.05.2023.
2. Шорников, Ю. В. Компьютерное моделирование гидравлических систем / Ю. В. Шорников, С. А. Мяндин // Молодой ученый. – 2017. – № 22 (156). – С. 104–110.
3. COMSOL [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics>. – Дата доступа: 08.06.2023.
4. Шешко, Н. Н. Трансформация русла реки Припять в районе н. п. Кнубово и н. п. Красово / Н. Н. Шешко, Н. Н. Шпендик, М. Ф. Кухаревич // ICER – 2021. Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, посвященной 55-летию Брестского государственного технического университета и 50-летию факультета инженерных систем и экологии, Брест, 7–8 октября 2021 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет; редкол.: А. А. Волчек [и др.]; науч. ред.: А. А. Волчек, О. П. Мешик. – Брест: БрГТУ, 2021. – С. 331–344.
5. Курушин, А. А. Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL – М., «One-Book», 2016. – 376 с.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОУДАРА В ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

*А. Э. Юницкий<sup>1</sup>, Н. С. Першай<sup>2</sup>, С. А. Арнаут<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Генеральный конструктор, ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь, a@unitsky.com

<sup>2</sup> Инженер-исследователь, ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь, n.pershai@unitsky.com

<sup>3</sup> Начальник КБ «Опытное оборудование», ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь, s.arnaut@unitsky.com

### Аннотация

В работе представлена информация об использовании электрогидравлической установки для получения водоугольной суспензии в качестве компонента технологии получения водоугольного топлива. Представлены основные результаты по получению водоугольной суспензии бурого угля на электрогидроударной установке UniThorr. Установлено влияние различных параметров работы установки (рабочий зазор, размер исходной фракции, загрузка, природа исходного сырья) на качество измельчения бурого угля. Показана возможность получения водоугольной суспензии с размерами частиц менее 250 мкм, что подтверждает возможность использования её в качестве компонента водоугольного топлива.

**Ключевые слова:** водоугольное топливо, водоугольная суспензия, электрогидравлический удар, бурый уголь, измельчение, дисперсионный анализ.

## USE OF ELECTRIC HYDRAULIC IMPACT FOR PREPARING OF WATER COAL FUEL

*A. Unitsky<sup>1</sup>, N. Pershai<sup>2</sup>, S. Arnaut<sup>3</sup>*

### Abstract

The article provides information on the use of an electro-hydraulic installation for producing a coal-water suspension as a component in the technology for producing coal-water fuel. It reflects the main results of the production of coal-water suspension from brown coal using the electro-hydraulic shock installation. The authors established the influence of various parameters of the installation (working gap, size of the initial part, loading, initial source) on the quality of grinding the nature of brown coal. They showed the possibility of obtaining a coal-water suspension with particle sizes less than 250 microns which confirms the possibility of using it as a component of coal-water fuel.

**Keywords:** water coal fuel, electrohydraulic impact, brown coal, shredding, analysis of variance.

**Введение.** Проблема обеспечения человечества, и населения Республики Беларусь в том числе, топливом и энергией, остро стоит как в настоящее время, так и в обозримом будущем. Одной из ключевых причин ее возникновения является дефицит энергоресурсов, большая часть которых импортируется. Поэтому повышение эффективности использования энергии, а также использования собственных природных источников сырья является одним из важных условий устойчивого развития национальной экономики. Это приводит к тому, что развитие комплексных и нетрадиционных подходов в использовании природного сырья является альтернативой общепризнанным и широко применяемым технологиям получения энергии. Так, применение бурого угля в качестве источника энергии известно давно. Однако использование его для получения энергии в виде водугольного топлива (ВУТ) получило широкое распространение в таких странах, как Китай и Япония. В частности, потребление угля в Китае за последний год выросло на 4,6 % и в 2022 году достигло максимального в истории страны значения в 4,5 млн тонн [1].

ВУТ представляет собой композиционную дисперсную систему, состоящую, как правило, из твёрдой фазы в виде мелкодисперсного угля, жидкой среды (вода) и пластифицирующего агента.

К основным преимуществам использования ВУТ относят [2]:

– экологические:

- пожаро- и взрывобезопасность при производстве, хранении, транспортировке и применении;
- снижение количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, таких как пыль, зола, оксиды азота и серы;
- уменьшение количества образующейся золы за счет более полного сгорания;

– технологические:

- при переводе теплогенерирующих установок на сжигание ВУТ не требуются существенные изменения конструкции установленных котлов (агрегатов);
- возможность полной механизации всех процессов (приготовление, транспортирование и использование);
- уменьшение температуры воспламенения с сохранением высокой степени сгорания горючей массы (97 %);
- возможность транспортирования несколькими видами транспорта (трубопроводным, железнодорожным, автомобильным, морским);
- сохранность технологических свойств при хранении и транспортировании;

– экономические:

- снижение стоимости 1 т у. т. за счет уменьшения эксплуатационных затрат на хранение, транспортировку и сжигание;
- уменьшение капитальных затрат при переводе ТЭЦ со сжигания природного газа и мазута на ВУТ;
- расчетный срок окупаемости не превышает 3 лет [2].

Но существуют и недостатки, препятствующие более широкому применению ВУТ в энергетике, среди которых:

- отсутствие утверждённой нормативно-технической базы (стандартов, технических условий, ГОСТов) в Республике Беларусь;
- низкие показатели стабильности технологических характеристик (седиментационной устойчивости).

Основные стадии приготовления ВУТ:

- предварительная подготовка угля (обогащение, сушка и т. д.);
- измельчение угля с получением водоугольной суспензии;
- добавление пластификатора.

Технологические свойства ВУТ определяются содержанием твердой фазы (угля), её дисперсностью, вязкостью, седиментационной устойчивостью, составом и свойствами химических добавок, содержанием минеральных примесей.

В таблице 1 представлены значения технологических свойств ВУТ.

**Таблица 1** – Технологические свойства ВУТ [3–8]

Показатель, единица измерения	Значения
Массовая доля твёрдой фазы (угля), %	58–70
Гранулометрический состав, мкм	менее 250
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	около 1200
Зольность твёрдой фазы, %	5–50
Низшая теплота сгорания, ккал/кг	2300–4700
Вязкость, при скорости сдвига 81 с <sup>-1</sup> , мПа·с	до 1000
Температура воспламенения, °С	450–650
Температура горения, °С	900–1150
Температура замерзания (без добавок), °С	0
Статическая стабильность, сут.	
– без применения добавок	до 5
– с применением добавок	от 30

Определяющим параметром водоугольной суспензии для получения ВУТ является гранулометрический состав, поэтому важно правильно подобрать оборудование для измельчения. При этом данная стадия технологического процесса является ещё и самой энергозатратной. Подбор оборудования для измельчения угля со сниженным энергопотреблением позволит снизить технологические затраты на производство топлива.

В качестве альтернативы традиционным способам измельчения угля обращают на себя внимание электрогидродарные установки (ЭГУ) [9–10]. Использование ЭГУ в промышленности достаточно разнообразно [9]. Известно о более чем 35 направлениях применения их в таких сферах, как машиностроение, добыча полезных ископаемых, строительство, горное дело, медицина, сельское хозяйство, экология, энергетика: дробление материалов, обогащение руд, извлечение остаточных полезных ископаемых из отвалов, разрушение различного рода объектов, смешивание растворов, очистка поверхностей и др.

Принцип работы ЭГУ основан на электрогидравлическом эффекте, сущность которого заключается в преобразовании электрической энергии в механическую

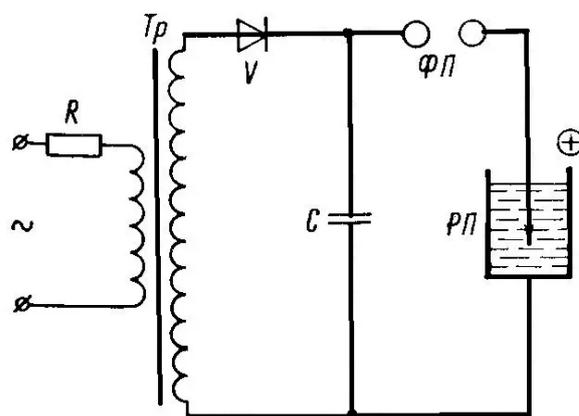
с высоким КПД. Происходит это за счёт того, что внутри объема жидкости протекает специально сформированный импульсный электрический разряд, вокруг зоны его образования возникают сверхвысокие импульсные давления, способные совершать механическую работу и сопровождающиеся комплексом физико-химических явлений [9]. Один из главных плюсов использования электрогидроударной технологии – экологичность, пожар- и взрывобезопасность.

Цель настоящей работы заключается в определении влияния различных параметров работы ЭГУ на измельчение бурого угля для получения водоугольной суспензии как исходного компонента ВУТ.

**Материалы и методы.** Исследования проводились на ЭГУ UniThorr, разработанной специалистами белорусской научно-инжиниринговой компании ЗАО «Струнные технологии» (рисунок 1а).



а



б

а – внешний вид рабочей камеры ЭГУ UniThorr, б – упрощённая электрическая схема  
 $R$  – зарядное сопротивление,  $Tr$  – трансформатор,  $V$  – выпрямитель, ФП – формирующий искровой промежуток, РП – рабочий и искровой промежуток,  $C$  – рабочая ёмкость конденсатора

**Рисунок 1** – Внешний вид и упрощенная электрическая схема ЭГУ UniThorr

Данная установка разрабатывалась для измельчения природных материалов, в частности бурого угля, с учетом недостатков традиционных моделей ЭГУ и обладает рядом уникальных особенностей:

- улучшенная конструкция установки, которая обеспечивает минимальную индуктивность разрядного контура при больших скоростях нарастания тока;
- компактность, позволяющая использовать установку в передвижных мобильных комплексах;
- оснащённость специально разработанной автоматизированной системой мониторинга высоковольтных импульсов, позволяющая оператору в режиме реального времени отслеживать эффективность работы ЭГУ;

– улучшенная конструкция положительного электрода, способствующая увеличению ресурса его работы в среде с высокой электропроводностью.

Основными составными частями ЭГУ являются генератор импульсных токов и рабочая камера. Рабочая камера состоит из емкости, внутри которой находится обрабатываемый материал, технологическая жидкость, отрицательный и положительный электроды. Упрощенная электрическая схема ЭГУ представлена на рисунке 1 (б). Некоторые технические характеристики ЭГУ UniThorr: рабочее напряжение – 40–55 кВ, энергия в импульсе – 300 Дж.

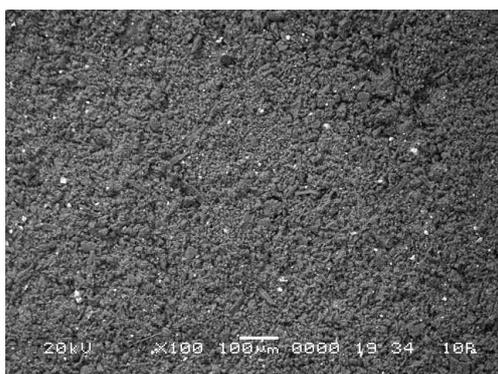
ЭГУ работает следующим образом. От высоковольтного трансформатора через выпрямитель и зарядное сопротивление заряжается конденсаторная батарея. При достижении требуемого напряжения по воздушному промежутку происходит подача напряжения на положительный электрод, расположенный в рабочей камере. Замыкание разрядного промежутка осуществляется искровым пробоем в жидкости между положительным и отрицательным электродами, расположенными внутри рабочей камеры. Отрицательный электрод представляет собой металлическую пластину, встроенную в дно камеры, положительный – имеет вид «карандаша» из диэлектрика, внутри которого находится металлический прут.

Для проведения исследований использован бурый уголь двух месторождений марки Б1: российский и казахстанский. Диапазон исходной фракции составлял от 0 до 50 мм. В качестве рабочей жидкости использовали водопроводную воду. Бурый уголь в виде водоугольной суспензии загружался в рабочую камеру и обрабатывался в течение заданного времени (от 0 до 60 мин).

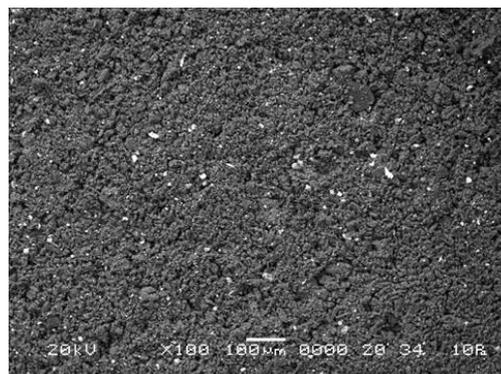
**Результаты и обсуждение.** Согласно основным техническим параметрам ВУТ (таблица 1), размеры частиц угля не должны превышать 250 мкм. Влияние крупности частиц угля на вязкость сказывается в зависимости от размеров частиц и от распределения частиц в полидисперсной угольной фазе. Для соблюдения других параметров ВУТ, таких как вязкость, седиментационная устойчивость, необходимо использовать более мелкую фракцию с размерами частиц менее 150 мкм. Правильно подобранный гранулометрический состав твердой фазы позволяет снизить динамическую вязкость и увеличить стабильность суспензии [3–8].

В настоящей работе проводилось исследование влияния электрогидравлического удара с энергией в импульсе 300 Дж на измельчение бурого угля различного происхождения, определялись основные параметры, влияющие на процесс измельчения.

Исследования влияния размера фракции показали, что между результатами измельчения угля разной фракции нет видимого различия (при установленных режимах). Это связано с тем, что частицы более крупного размера разрушаются быстро и дальнейшее измельчение происходит с такой же скоростью, как и для самой маленькой фракции (рисунок 2).



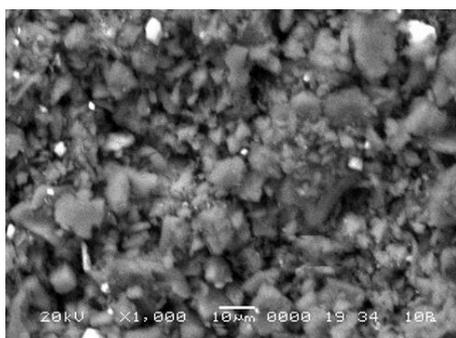
фракция 3–5 мм



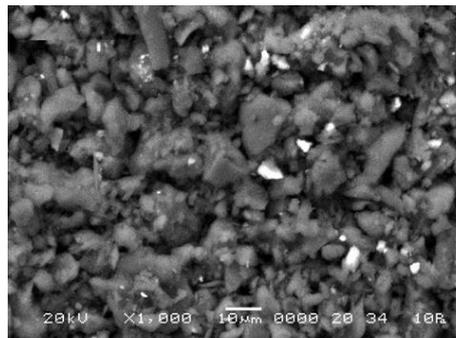
фракция 7–50 мм

**Рисунок 2** – Электронно-микроскопические изображения структуры образцов бурого угля с различной исходной фракцией после 15 мин измельчения (кратность увеличения  $\times 100$ )

Проведённые исследования показали эффективное дробление крупных фракций угля размером 7–50 мм в течение 15 мин. Увеличение времени измельчения угля более 20 мин независимо от размера исходной фракции угля приводит к получению образцов с визуально одинаковым гранулометрическим составом и однородностью измельчения, однако изменяется форма частиц с округлой на более вытянутую (рисунок 3).



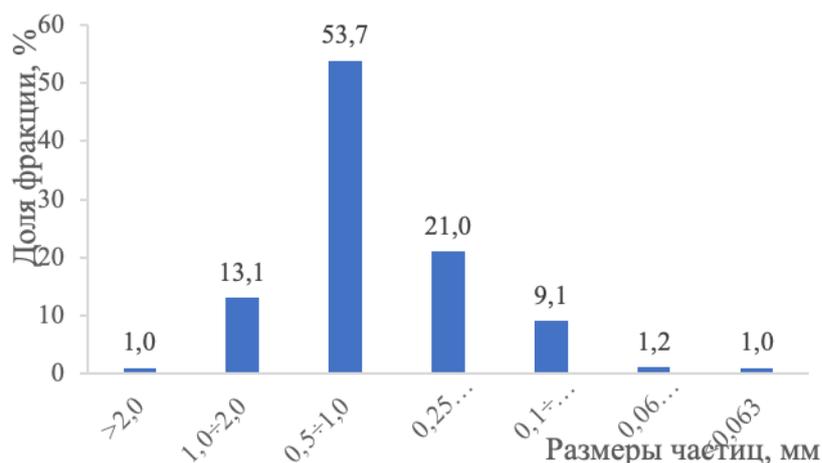
фракция 3–5 мм



фракция 7–50 мм

**Рисунок 3** – Электронно-микроскопические изображения структуры образцов бурого угля с различной исходной фракцией после 15 мин измельчения (кратность увеличения  $\times 1000$ )

Влияние размера рабочего зазора между положительным и отрицательным электродом весьма значимо, особенно при увеличении проводимости рабочей среды. Оптимальный рабочий зазор составил 30–35 мм для данной рабочей камеры и одинаковых условиях работы установки. Увеличение рабочего зазора приводит к снижению качества измельчения и появлению частиц с размером более 250 нм (рисунок 4).



**Рисунок 4** – Гранулометрический анализ образца бурого угля после измельчения в течение 15 мин при рабочем зазоре 50 мм

Область эффективного измельчения в рабочей камере определяется параметрами ЭГУ и ограничена размером кавитационного пузыря (рисунок 5), поэтому существенное влияние на эффективность измельчения бурого угля оказывает размер рабочей камеры. Проведённые исследования показали, что увеличение её диаметра приводит к снижению производительности установки. Это обусловлено тем, что в процессе электрогидроудара более крупные частицы угля разбрасываются и оседают по краям камеры, не попадая в область кавитационного пузыря и не принимая участия в процессе измельчения. Увеличение загрузки камеры в данном случае не позволяет решить проблему и приводит к ещё большему ухудшению работы ЭГУ.

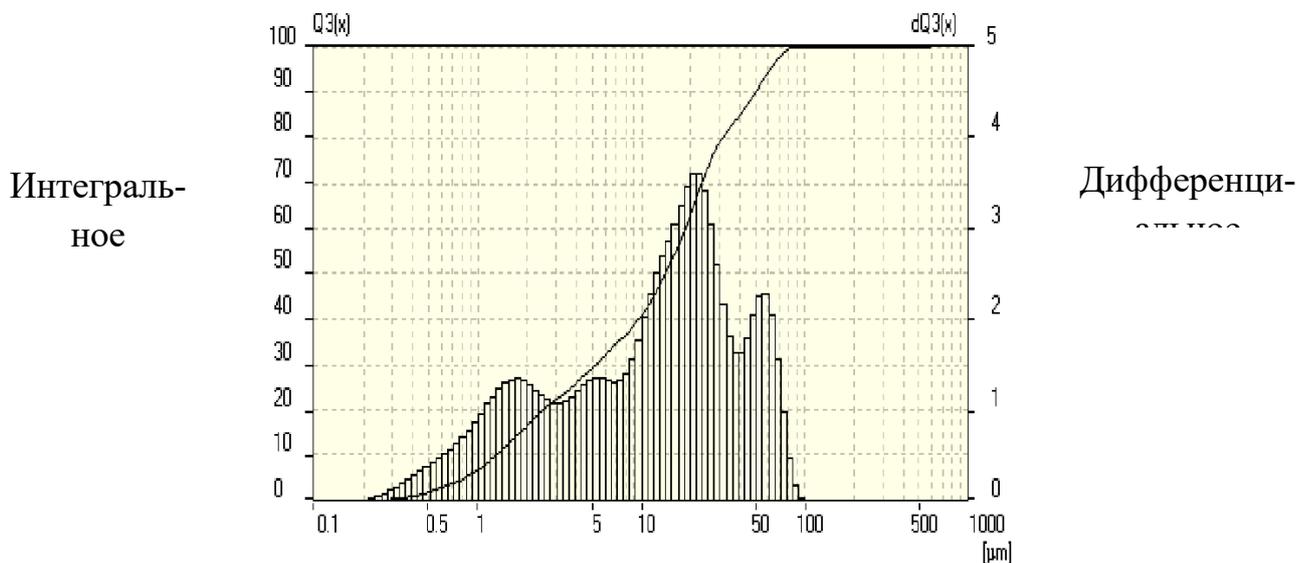


**Рисунок 5** – Изображение кавитационного пузыря при протекании электрогидравлического удара в жидкости

Увеличение времени обработки угля ожидается приводит к улучшению качества дробления. Однако времени обработки в диапазоне 10–15 мин достаточно для получения частиц размером  $\leq 250$  мкм более 75 % (рисунок 6).

Дальнейшее увеличение времени обработки (более 15 мин) не приводит к значительному увеличению доли частиц меньшего размера. Это, вероятно, обусловлено тем, что при длительной обработке в дискретных камерах протекают два противоположных процесса – измельчение и коагуляция. При протекании про-

цесса в камере непрерывного режима работы при отведении суспензии с частицами менее 250 мкм для разделения их на гидроциклонах влияние процесса коагуляции снижается и частиц меньшего размера становится больше.



**Рисунок 6** – Интегральная и дифференциальная кривые распределения частиц бурого угля после измельчения в течение 10 мин

В работе использовали два вида сырья, физико-химические свойства которых отличаются. При использовании казахского бурого угля наблюдается значительный рост удельной электропроводности водоугольной суспензии от 1000–1100 до 1800 мкСм/см и выше (для сравнения средняя удельная электропроводность суспензии российского бурого угля составляет 700–800 мкСм/см). Такая проводимость приводит к снижению работоспособности установки, появлению так называемых «холостых» разрядов. Данный недостаток был устранён путём доработки конструкции ЭГУ и корректировки технологических параметров.

Исследование зависимости природы исходного сырья на качество измельчения показало, что во времени это влияние нивелируется. Выявлено, что природа сырья большее влияние оказывает на работу самой ЭГУ, чем на степень измельчения. Это следует учитывать при смене сырья путём корректировки параметров работы установки для выхода на заданную производительность.

**Заключение.** В данной работе приведены краткие результаты исследований по измельчению бурого угля на ЭГУ как компонента ВУТ.

1. Описаны основные результаты по влиянию различных технологических параметров на качество измельчения бурого угля:

- природа сырья влияет на скорость измельчения бурого угля, величину удельной электропроводности водоугольной суспензии, что требует корректировки технологических параметров работу ЭГУ при его замене;

- размер исходной фракции (до 50 мм) не оказывает существенного влияния на качество измельчения исходного сырья, что позволяет исключить необходимость предварительно фракционирования сырья перед поступлением в рабочую камеру;

– конструкция рабочей камеры (в том числе ее диаметр) оказывает существенное влияние на эффективность измельчения бурого угля. Ее диаметр определяется исходя из технических характеристик ЭГУ;

– величина рабочего зазора между электродами зависит от электрических параметров ЭГУ и удельной проводимости рабочей среды;

2. Установлены оптимальные режимы работы ЭГУ UniThorr для получения водоугольной суспензии как компонента ВУТ (время измельчения для двух видов бурого угля, диаметр рабочей камеры, требуемая загрузка, размер исходной фракции, рабочий зазор).

3. Полученные результаты положены в основу дальнейших исследований по получению ВУТ.

### Список цитированных источников

1. China's coal use increased to a record high in 2022, IEA says [Electronic resource]. Mode access: <https://www.rfa.org/english/news/environment/coal-07282023072108.html>. – Date access: 25.08.23.
2. Тажибаев, К. Т. Перспективы применения водоугольного топлива в энергетике / К. Т. Тажибаев, Д. К. Тажибаев, К. О. Дуйшеев // Уголь. – 2020. – № 1. – С. 55–57.
3. Овчинников, Ю. В. Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий / Ю. В. Овчинников, Е. Е. Бойко. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2017. – 308 с.
4. Баранова, М. П. Физико-химические основы получения топливных водоугольных суспензий / М. П. Баранова, В. А. Кулагин. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2011. – 160 с.
5. Макаров, А. С. Водоугольное топливо на основе углей различной стадии метаморфизма / А. С. Макаров, Д. П. Савицкий, А. И. Егурнов // Современная наука: сборник научных статей. – 2011. – № 1(6). – С. 16–20.
6. Савицкий, Д. П. Реологические свойства водоугольных суспензий на основе бурых углей в присутствии натриевых лигносульфонатов и щелочи / Д. П. Савицкий, А. С. Макаров, В. А. Завгородний // Химия твёрдого топлива. – 2009. – № 5. – С. 73–77.
7. Водоугольное топливо на основе антрацита / К. В. Макарова [и др.] // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 5. – С. 3–5.
8. Ходаков, Г. С. Водоугольные суспензии в энергетике / Г. С. Ходаков // Теплоэнергетика. – 2007. – № 1. – С. 35–45.
9. Юткин, Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. – Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.
10. Морозов, А. Г. Гидроударные технологии для получения водоугольного топлива / А. Г. Морозов, Н. В. Коренюгина // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 7 (119). – С. 18–21.

## О ПРИМЕНЕНИИ ДРЕВЕСНО-ТОРФЯНЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ ДРЕВЕСНОГО КОМПОСТА

*Н. П. Яловая<sup>1</sup>, Ю. С. Дордюк<sup>2</sup>, П. С. Яловой<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Проректор по воспитательной работе, учреждение образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь, yalnat@yandex.by

<sup>2</sup>Заведующий кафедрой экономики и организации строительства, учреждение образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь, jul4onka@mail.ru

<sup>3</sup>Заместитель начальника производственно-технического отдела, ПУ «Кобрингаз» УП «Брестоблгаз», г. Кобрин, Республика Беларусь, yalrav@mail.ru

### Аннотация

В статье представлен анализ использования различных видов древесных отходов лесопромышленных комплексов и деревоперерабатывающих предприятий, а также возможность использования древесно-торфяных отходов в качестве древесного компоста. Представлены результаты дисперсного состава проб, выполнены измерения кислотности, содержания влаги, минерального состава и органических веществ образцов исследуемых древесно-торфяных отходов.

**Ключевые слова:** древесина, древесно-торфяные отходы, компост, мобильная дробилка.

## ABOUT THE USE OF WOOD AND PEAT WASTE AS WOOD COMPOST

*N. P. Yalavaya<sup>1</sup>, Yu. S. Dardziuk<sup>2</sup>, P. S. Yalavy<sup>3</sup>*

### Abstract

The article presents an analysis of the use of various types of wood waste from timber industry complexes and wood processing enterprises, as well as the possibility of using wood and peat waste as wood compost. The results of the dispersed composition of samples are presented, measurements of acidity, moisture content, mineral composition and organic substances of samples of the studied wood and peat waste are performed.

**Keywords:** wood, wood and peat waste, compost, mobile crusher.

**Введение.** Повышение эффективности использования древесины является важной проблемой для Республики Беларусь, так как в процессе заготовки леса и изготовления изделий из нее остается существенное число древесных отходов. В процессе заготовки около 20 % древесины попадает в древесные отходы. Отходами заготовки древесины считаются корневища, сучья, кора и хвоя деревьев.

Значительная часть древесных отходов так и остается невостребованной и способствует загрязнению компонентов окружающей среды. Данные отходы

чаще всего остаются в местах заготовки древесного сырья или подлежат захоронению. Вместе с тем эти отходы обладают рядом ценных потребительских характеристик, позволяющих использовать их в качестве топлива при благоустройстве, в садоводстве, ландшафтном дизайне и различных отраслях промышленности.

**Материалы и методы.** Основными источниками образования древесных отходов являются различные лесопромышленные комплексы и деревоперерабатывающие предприятия. Древесные отходы образуются в большом количестве практически на всех стадиях технологического процесса: лесозаготовки, лесопиления и деревообработки и могут использоваться в виде вторичных древесных ресурсов в различных отраслях промышленности Республики Беларусь.

Образующиеся древесные отходы можно классифицировать:

- по сортименту исходного сырья (отходы пиломатериалов, отходы фанеры и древесноволокнистых плит, отходы древесностружечных плит);
- по породам древесины (хвойная, лиственная);
- по влажности (сухие – до 15 %, полусухие – 16-30 %, влажные – 31 % и выше, сверхвлажные – 100 % и выше);
- по форме и размеру частиц (кусковые, мягкие);
- по стадийности обработки (первичные, вторичные).

Согласно СТБ 1867-2017 «Отходы древесные. Общие технические условия» [1] к отходам, полученным в процессе лесозаготовки, относятся: вершина, ветви, козырек, кора, отрезки хлыстов, откомлевка, пневая древесина, сучья.

К отходам, полученным в процессе лесопиления и деревообработки, относятся: горбыль, древесная пыль, древесная стружка, карандаш, кора, обрезки шпона, опилки, отрезки пиломатериалов, отструг.

Согласно Общегосударственному классификатору Республики Беларусь ОКРБ 021-2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь» [2] для древесных отходов выделен отдельный раздел 7 «Древесные отходы», который в свою очередь подразделяется на группы: 1 – «Отходы обработки и переработки древесины» (52 наименования отходов), 2 – «Древесные отходы производства и потребления» (24 наименования отходов) и 3 – «Древесные отходы, полученные в процессе лесозаготовки» (5 наименований отходов).

Количество отходов деревообрабатывающих производств зависит от качества поставляемого сырья, типа и размера изготавливаемой продукции, технической оснащённости предприятия и его мощности и составляет 45–63 % исходного сырья (пиломатериалов, фанеры).

Вместе с тем древесные отходы, остающиеся при обработке древесного сырья, – материал, используемый во многих производствах. Их применяют:

– *Для энергетики.* В связи с прогрессирующим истощением ресурсов нефти и газа и все большими трудностями освоения их новых месторождений в последние годы ведутся интенсивные разработки технологии превращения различных видов биомассы (в том числе отходов сельскохозяйственного производ-

ства и древесины) в топливо. Потребление биомассы в ряде стран в качестве топлива заметно увеличивается.

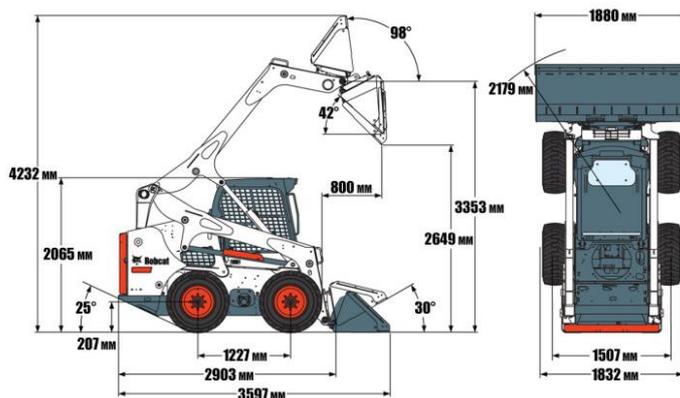
– **В сельском хозяйстве.** Различные отходы древесного и другого вида сырья можно использовать для производства удобрений многоцелевого назначения. Способы переработки этих отходов базируются на микробиологических принципах с использованием природных бактерий, которые развиваются в благоприятных условиях. Сучья, кора, стружка и опилки увлажняют, формируют в рыхлые кучи и заражают культурой специально выведенных бактерий. Процесс созревания компоста протекает с выделением тепла в течение 7–8 недель. В сельском хозяйстве компост из древесных отходов в сочетании с различными органическими и минеральными удобрениями может использоваться для обогащения бедных почв и получения высоких урожаев различных сельскохозяйственных культур.

– **В лесном хозяйстве.** В процессе перегнивания отходов образуются естественные удобрения, насыщенные микроэлементами, которые необходимы для возобновления леса. От правильной организации очистки лесосек зависит качество лесовозобновления. Хотя лесосечные отходы улучшают для техники проходимость, однако они затрудняют испарение влаги и прогрев почвы, содействуют накоплению снега и задержанию его таяния. Это усиливает заболачиваемость лесосек, создает трудности для прорастания семян и появления всходов.

Целью настоящих исследований является анализ использования мобильной дробилки (кустореза) «Bobcat» на базе погрузчика «Bobcat» с бортовым поворотом S770 для получения древесно-торфяных отходов с высоким содержанием органических веществ, пригодных для использования в качестве топлива или древесного компоста.

Для получения торфодревесного топлива измельчаются куски торфа и древесины, образующиеся при подготовке торфа для брикетирования, а также древесного сырья, образующегося при строительстве полей добычи торфа (сучья, ветви, вершины, отходы корчевания пней, отрезки хлыстов, козырьки, откомлевки и т. п.). Топливо получают путем смешивания измельченной крупной фракции фрезерного торфа и древесной щепы. Древесную щепу получают путем измельчения древесных отходов, образующихся при строительстве полей добычи торфа, сводки леса. При изготовлении древесной щепы из пней, после получения древесной щепы, ее необходимо просеивать для удаления песка и почвы.

Высокопроизводительная мобильная дробилка (кусторез) «Bobcat» (рисунки 1, 2) предназначена для измельчения деревьев, кустарника и травы. В результате работы кустореза остается слой измельченной растительности, его можно использовать для расчистки тропинок, рабочих площадок, садов и других лесных зон.



**Рисунок 1 – Погрузчик «Bobcat» с бортовым поворотом S770**



**Рисунок 2 – Мобильная дробилка (кустореz) «Bobcat» на базе погрузчика «Bobcat» с бортовым поворотом S770 (общий вид и работа в полевых условиях),**

**Результаты и обсуждение.** Для проведения испытаний были приготовлены две пробы, состоящие из кусковых отходов древесины и почвы:

– проба № 1 – проба грунта с поля после дробления мобильной дробилкой (кусторезом) «Bobcat»;

– проба № 2 – проба торфобрикетной массы.

Результаты исследований дисперсного состава по двум пробам приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Результаты исследований дисперсного состава

№	Наименование пробы	Размер ячейки сита, мм	Вес материала на сите	
			кг	%
1	Проба № 1. Вес 10,1 кг	более 120	–	–
2		120	–	–
3		80	0,5	4,9
4		40	2,6	25,5
5		20	4,8	47,1
6		10	1,5	14,7
7		менее 10	0,8	7,8
8	Проба № 2. Вес 10,3 кг	более 120	–	–
9		120	–	–
10		80	0,6	5,7
11		40	2,4	22,8
12		20	5,1	48,6
13		10	1,3	12,4
14		менее 10	1,1	10,5

Химический и органический состав почв определяли по методикам согласно нормативным стандартам [3–5]. Полученные результаты измерений сведены в таблицу 2.

**Таблица 2** – Результаты измерений состава проб

Наименование показателя	Проба № 1	Проба № 2
Массовая доля органического вещества ( $X$ ), %	79,85	21,21
Массовая доля влаги ( $W$ ), %	55	30
Содержание хлорид-ионов в водной вытяжке, %	0,0053	0,0071
Содержание сульфат-ионов в водной вытяжке, ммоль/100 г почвы	0,48	0,85
Содержание гидрокарбонат-ионов, $HCO_3^-$ , ммоль/100 г почвы	0,35	0,575
Кислотность (водородный показатель pH солевой вытяжки)	5,71	7,0

**Заключение.** При правильной эксплуатации мобильной дробилки (кустореза) «Bobcat» на базе погрузчика «Bobcat» с бортовым поворотом S770 (в соответствии с руководством по эксплуатации и техническому обслуживанию) и на

основании проведенных исследований на данном оборудовании можно получить качественную смесь древесно-торфяных отходов для использования в качестве древесного компоста.

Получаемый древесно-торфяной компост обладает благоприятным химическим составом, что позволяет правильно перерабатывать органические отходы без вреда окружающей среде. Биологический способ утилизации древесных отходов – возможность сохранить ценные природные органические ресурсы и использовать их во благо в самых разных целях. Сфера применения древесного компоста широкая:

- Садоводство и цветоводство. Компост на основе древесных отходов с добавлением органического сырья – лучшее удобрение, способное улучшить состав почвы и помочь плодовым деревьям, кустарникам и цветникам эффективно развиваться, цвести и плодоносить в любом климате.

- Ландшафтный дизайн. Иногда на участке недостаточно сбалансированная почва для создания цветника с определенными типами растений, прихотливыми к составу грунта. В этом случае использование компоста позволит решить данную проблему без лишних усилий.

- Повышение плодородия почвы. В сельском хозяйстве компост из древесных отходов в сочетании с различными органическими и минеральными удобрениями используется для обогащения бедных почв и получения высоких урожаев различных сельскохозяйственных культур.

- Озеленение территории и рекультивация нарушенных земель полигонов и карьеров. Почвы, требующие рекультивации, быстро восстанавливаются при использовании органических удобрений. Слой древесного компоста создает питательную среду для выращивания газонов.

- Засыпка верхнего слоя земли при повреждении строительными и бытовыми отходами. Поврежденный верхний слой почвы сложно восстановить, на это требуется не один год. В этом случае древесный компост позволяет ускорить процесс восстановления и сбалансировать состав грунта.

### **Список цитированных источников**

1. Отходы древесные. Общие технические условия: СТБ 1867-2017 – Введ. 2017-10-01. – Минск : Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь, 2017. – 12 с.
2. Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь: ОКРБ 021-2019. – Введ. 2019-12-09. – Минск : Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 2019. – 84 с.
3. Почвы. Методы определения органического вещества: ГОСТ 26213-2021 – Введ. 2023-02-01. – Минск : Госстандарт, 2022. – 12 с.
4. Почвы. Методы определения иона сульфата в водной вытяжке: ГОСТ 26426-85 – Введ. 1986-01-01. – М. : Госкомитет СССР, 1986. – 7 с.
5. Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке: ГОСТ 26425-85 – Введ. 1986-01-01. – М. : Госкомитет СССР, 1986. – 10 с.

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРОГРАММ

*П. Ф. Янчилин<sup>1</sup>, Ю. В. Каперейко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, БрГТУ, Брест, Беларусь, email: tgv\_bstu@tut.by

<sup>2</sup>Преподаватель-стажер, БрГТУ, Брест, Беларусь, email: yulya.kapereyko@mail.ru

### **Аннотация**

В данной статье представлены результаты по исследованию особенностей аэродинамического расчета разветвленной приточно-вытяжной системы кондиционирования в компьютерной программе MagiCAD Revit и установлены различия в результатах расчета, которые влияют на строительство и эксплуатацию этой системы.

**Ключевые слова:** потери давления, воздуховоды, воздухораспределитель, расход воздуха, диаметр воздуховода, аэродинамический расчёт.

## ANALYSIS OF FEATURES OF AERODYNAMIC CALCULATION OF AN AIR CONDITIONING SYSTEM USING SPECIALIZED PROGRAMS

*P. Yanchilin, Y. Kapereyko*

### **Abstract**

This article presents the results of a study of the features of aerodynamic calculations in the MagiCAD Revit computer program and identifies differences in the calculation results that affect the construction and operation of this system.

**Keywords:** pressure loss, air ducts, air distributor, air flow, air duct diameter, aerodynamic calculation.

**Введение.** Вентиляция – обмен воздуха в помещениях для удаления избытков теплоты, влаги, вредных и других веществ с целью обеспечения допустимых параметров микроклимата и чистоты воздуха в рабочей или обслуживаемой зоне помещения. Также вентиляцией называют систему воздуховодов и каналов, обеспечивающих требуемый воздухообмен в помещении. Микроклимат – совокупность факторов, определяющих метеорологическую обстановку в помещении. К этим факторам относятся: температура воздуха, относительная влажность, скорость движения (подвижность) воздуха в рабочей или обслуживаемой зоне помещения.

Поддержание необходимого качества воздуха в помещении является главной задачей систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

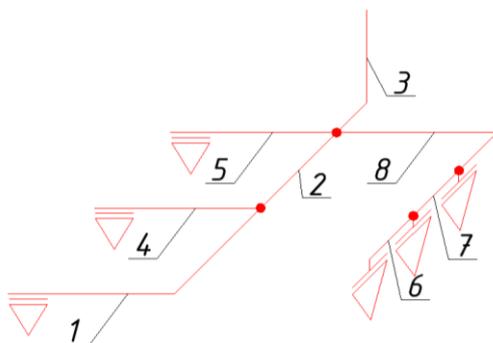
Приточные системы вентиляции подают чистый воздух в помещение, вытяжные – удаляют загрязненный воздух из помещения. Системы вентиляции могут быть с механическим побуждением движения воздуха с помощью вентиляторов,

эжекторов и с естественным побуждением движения воздуха за счет действия гравитационных сил и воздействия ветра.

Системы вентиляции являются самыми давними инженерными коммуникациями, однако их расчет все еще является не до конца исследованным и разработанным. В настоящее время стали применяться специальные программы для быстрого и удобного расчета систем вентиляции и кондиционирования. Одной из таких программ является MagiCAD Revit.

**Материалы и методы.** Методологическая основа исследования состояла из сбора данных, комплексного анализа существующих способов расчета. Исследование проводилось посредством расчетов и моделирования на примере модели системы кондиционирования.

**Результаты и обсуждение.** Аэродинамический расчет воздуховодов сводится к определению их диаметров  $d$ ,  $m$ , а также потерь давления на отдельных участках при заданном расходе воздуха  $L$ ,  $m^3/ч$ , и скорости  $V$ ,  $m/с$ , на участке (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Пример аксонометрической схемы системы вентиляции

Аэродинамический расчет воздуховодов начинается с вычерчивания аксонометрической схемы, проставления номеров участков, их нагрузок  $L$ ,  $m^3/ч$ , и длин  $l$ ,  $m$ . Определяется направление аэродинамического расчета – от наиболее удаленного и нагруженного участка до вентилятора. Отметим, что в приточных системах расчет ведется обычно против движения воздуха, а в вытяжных – вдоль этого движения.

Расчет начинают с удаленного участка, рассчитывается его диаметр  $d$ ,  $m$ , или площадь поперечного сечения прямоугольного воздуховода  $F$ ,  $m^2$ .

Участок – это отрезок воздуховода, характеризующийся постоянным расходом воздуха. Границами между отдельными участками служат тройники или решетки.

$$F = \frac{L}{3600 \cdot v_{рек}} \quad (1)$$

Рекомендуемая скорость воздуха в воздуховодах общественных зданий (механическое побуждение):

- магистрали – 8–12  $m/с$ ;
- ответвления – не менее 5  $m/с$ .

Рекомендуемая скорость воздуха в воздуховодах производственных зданий:

- магистрали – 10–16  $m/с$ ;
- ответвления – не менее 5  $m/с$ .

Воздуховоды, по которым транспортируется незапыленный воздух, обычно рассчитываются по методу удельной потери давления по формуле

$$P = R \cdot l + Z, \quad (2)$$

где  $P$  – потери давления на участке воздуховода, Па;

$R$  – потери на трение на 1 м длины, Па;

$l$  – длина участка, м;

$Z$  – потери давления в местных сопротивлениях, Па.

Коэффициенты местных сопротивлений подбираем исходя из таблиц. Местными сопротивлениями являются: отводы, тройники, крестовины, решетки (воздухораспределительные устройства). При расчете тройника на проходе или на ответвлении рассчитываются такие величины, как

$$\xi_{\text{п}} = \frac{f_{\text{п}}}{f_c} = \frac{d_{\text{п}}^2}{d_c^2}, \quad \xi_o = \frac{f_o}{f_c} = \frac{d_o^2}{d_c^2}, \quad \frac{L_{\text{п}}}{L_c}, \quad (3)$$

$f_{\text{п}}, f_o, f_c$  – площадь прохода, ответвления и ствола тройника;

$L_o, L_c$  – расход воздуха в ответвлении и стволе тройника;

$\xi_{\text{п}}, \xi_o$  – коэффициент сопротивления прохода и ответвления тройника, отнесенные соответственно к скорости воздуха в проходе и ответвлении.

Исходя из полученных соотношений, находим из таблиц необходимые коэффициенты. Невязка ответвлений с главным направлением не должна превышать 10 %.

В случае же если воздуховоды имеют не круглую форму, а прямоугольную, то для них используются те же формулы, однако вводится величина эквивалентного диаметра  $d_{\text{ЭКВ}}$ , м, которая находится по формуле

$$d_{\text{ЭКВ}} = \frac{2ab}{a+b}, \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  – длины сторон воздуховода, м.

Для точности расчетов также рекомендуется учитывать поправочный коэффициент абсолютной шероховатости  $n$ , который учитывает изменение радиуса (размеров) воздуховода вследствие неровностей на его внутренней поверхности.

Аэродинамический расчет заканчивается подбором вентиляционного оборудования по требуемому расходу и потерям давления по главному направлению. Рекомендуется подбирать установку с запасом, т. е. умножить критерии для подбора на коэффициент 1,1–1,2.

Таким образом, аэродинамический расчёт с помощью номограмм и таблиц является удобным вариантом для проектирования систем вентиляции и кондиционирования, так как позволяет непосредственно контролировать различные параметры, такие как размеры воздуховодов, форма поперечного сечения, скоростной режим по ходу движения воздуха, потери по длине, при необходимости позволяет изменять конфигурацию вентиляционной системы в ходе самого расчета.

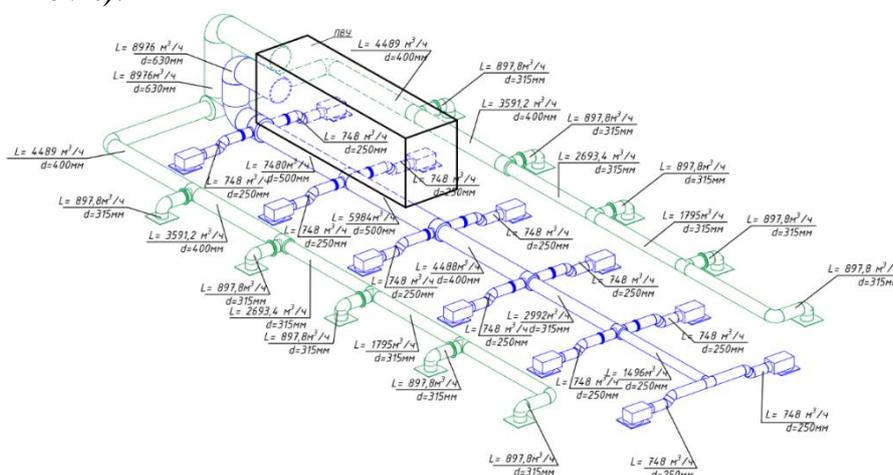
По мере развития IT-технологий появляется множество программ для автоматизированного расчета различных инженерных систем, конструкций, схем. Одной из таких программ является MagiCAD, которая позволяет

производить автоматический расчет систем вентиляции и кондиционирования, балансировку системы воздуховодов. Однако насколько такой метод расчета является эффективным?

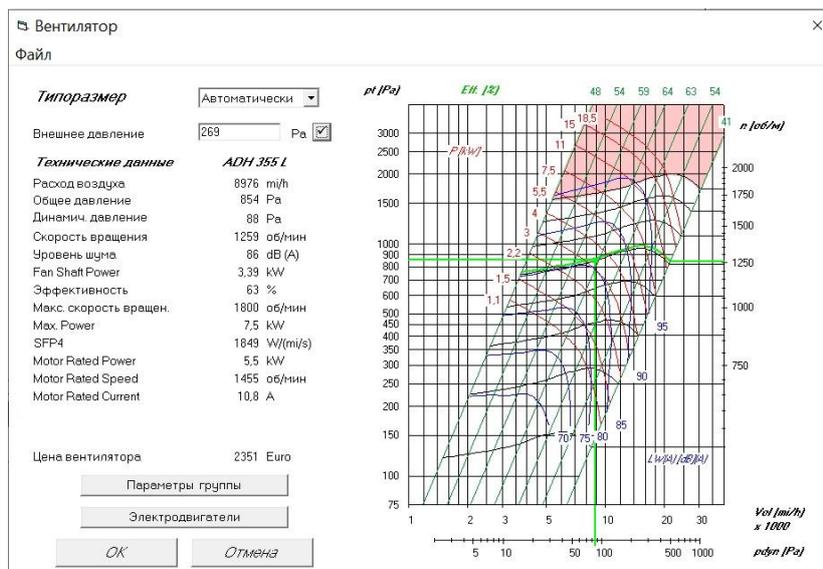
Для сравнения двух методов расчета, автоматического и «вручную», возьмем модель здания с разветвленной приточно-вытяжной системой кондиционирования (рисунок 2). Первый расчет производим в программе MagiCAD Revit, второй – с помощью таблиц и номограмм, по максимально допустимым скоростям: 5–8 м/с в ответвлениях, 8–12 м/с в магистральных воздуховодах.

По результатам проведенных расчетов получается, что в приточной системе кондиционирования:

1. При автоматическом расчете в программе MagiCAD Revit потери давления составляют  $\Delta P = 269,1$  Па при расходе воздуха  $8976$  м<sup>3</sup>/ч (на основании отчета из MagiCAD Revit).



**Рисунок 2** – 3D модель системы кондиционирования помещения, выполненная и рассчитанная в программе MagiCAD Revit



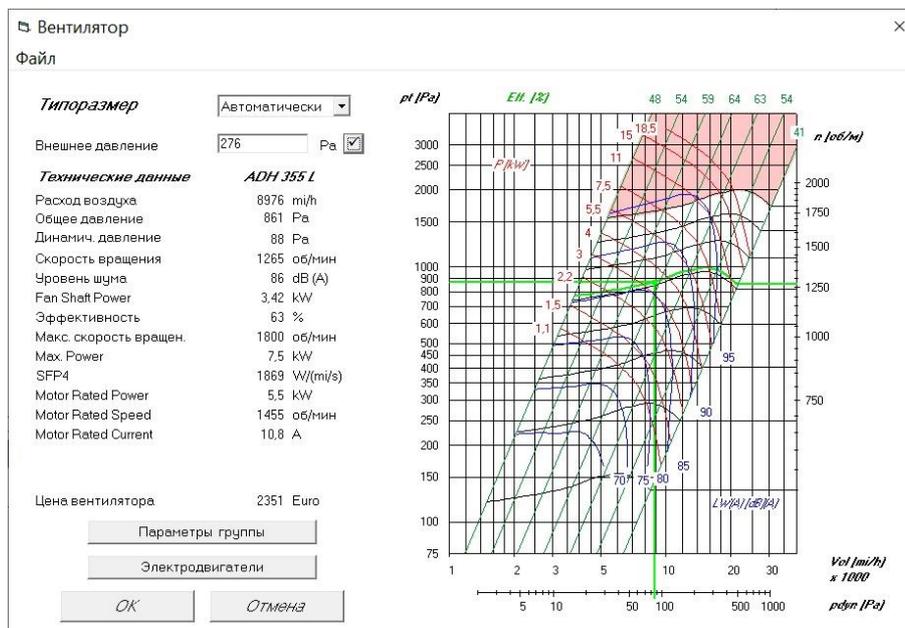
**Рисунок 3** – Технические данные вентилятора, подобранного для системы кондиционирования, рассчитанной в программе MagiCAD Revit

2. При расчете с помощью номограмм потери давления по главному направлению составляют 275,77 Па при расходе воздуха 8976 м<sup>3</sup>/ч (таблица 1). Ниже приведен аэродинамический расчет только главного направления системы кондиционирования, так как результатом такого расчета является подбор вентиляционного оборудования, которое подбирается исходя из значений максимальных потерь давления по главному направлению, т. е. в данном случае можно не рассматривать расчет ответвлений.

**Таблица 1** – Аэродинамический расчет главного направления системы кондиционирования.

№	L, м <sup>3</sup> /ч	l, м	d, мм	v, м/с	R, Па	R*l, Па*м	P <sub>л</sub> , Па	Σξ	Z=P <sub>л</sub> *Σξ	xP <sub>впр</sub> , Па	R*l+Z, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Главное направление (1-8)											
ВР			250							58	58
1	748	0,805	200	6,9	4,25	3,421	28,566	0,25	7,142		10,563
2	748	1	200	6,6	2,6	2,600	26,136	1,15	30,056		32,656
3	1496	3,6	250	8,3	3,1	11,160	41,334	0,35	14,467		25,627
4	2992	3,6	315	10,3	3,5	12,600	63,654	0,36	22,915		35,515
5	4488	3,6	400	9,7	2,3	8,280	56,454	0,37	20,888		29,168
6	5984	3,6	500	8,3	1,3	4,680	41,334	0,15	6,200		10,880
7	7480	3,6	500	10,2	1,9	6,840	62,424	0,33	20,600		27,440
8	8976	3,665	550	10,5	1,7	6,231	66,150	0,6	39,690		45,921
Суммарные потери давления, Па:											275,770

Расхождение значений потерь давления по отношению к автоматическому расчету составляет 6,67 Па или  $\delta = \frac{275,8 - 269,1}{269,1} = 2,5\%$ .



**Рисунок 4** – Технические данные вентилятора, подобранного для системы кондиционирования, рассчитанной по номограммам и таблицам

Таким образом, отклонение от автоматизированного расчета небольшое, однако главным отличием служат подобранные диаметры воздуховодов (таблица 2). Вентиляционное оборудование для обоих вариантов, как видно из рисунка 3 и 4, является одинаковым.

**Таблица 2** – Диаметры воздуховодов, подобранные по программе MagiCAD Revit и по номограммам

№ участка	D, мм, подобранные в MagiCAD Revit	D, мм, подобранные по номограммам
1	250	200
2	250	200
3	250	250
4	315	315
5	400	400
6	500	500
7	500	500
8	630	550

Заметно, что диаметры на начальном и конечном участках отличаются. Из-за того, что диаметры, рассчитанные по номограммам, имеют меньший размер, это приводит к увеличению потерь давления. Рассчитаем по номограммам систему с такими же диаметрами, подобранными в программе MagiCAD Revit (т. е. изменим диаметры на участках 1, 2, 8) (таблица 3).

**Таблица 3** – Аэродинамический расчет главного направления системы кондиционирования (с пересчетом участков 1, 2, 8)

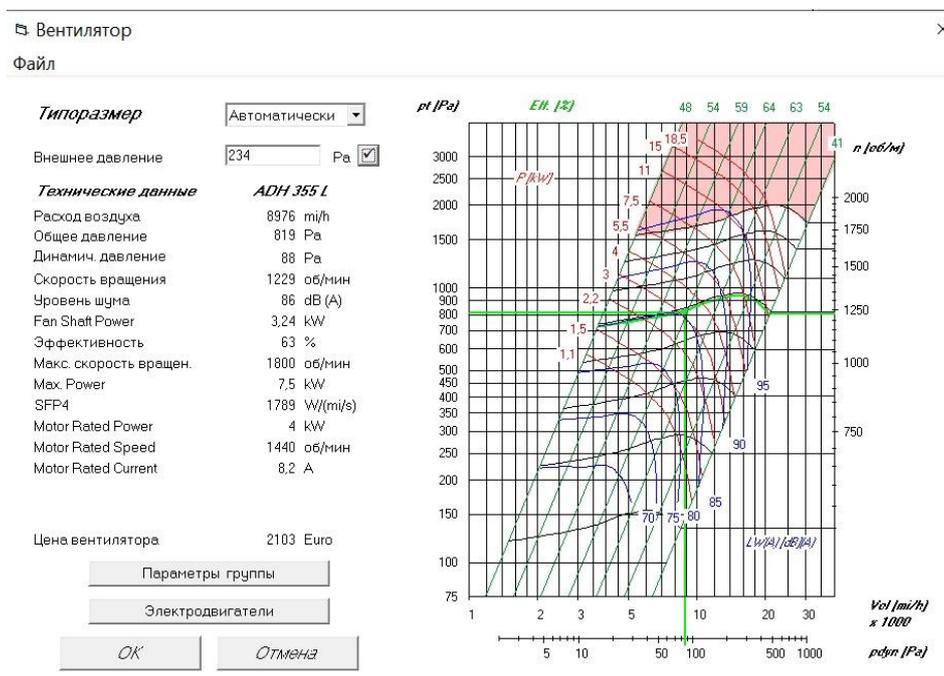
№	L, м <sup>3</sup> /ч	l, м	d, мм	v, м/с	R, Па	R*l, Па*м	P <sub>д</sub> , Па	Σξ	Z=P <sub>д</sub> *Σξ	хP <sub>вп</sub> , Па	R*1+Z, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Главное направление (1-8)											
ВР			250							58	58
1	748	0,805	250	4,3	1,36	1,095	11,094	0,25	2,774		3,868
2	748	1	250	4,25	0,95	0,950	10,838	1,15	12,463		13,413
3	1496	3,6	250	8,3	3,1	11,160	41,334	0,35	14,467		25,627
4	2992	3,6	315	10,3	3,5	12,600	63,654	0,36	22,915		35,515
5	4488	3,6	400	9,7	2,3	8,280	56,454	0,37	20,888		29,168
6	5984	3,6	500	8,3	1,3	4,680	41,334	0,15	6,200		10,880
7	7480	3,6	500	10,2	1,9	6,840	62,424	0,4	24,970		31,810
8	8976	3,665	630	7,9	0,89	3,262	37,446	0,6	22,468		25,729
							Суммарные потери давления, Па:				234,011

В данном случае расхождение значений потерь давления по отношению к автоматическому расчету составляет 35,09 Па или  $\delta = \frac{269,1-234,011}{269,1} = 13\%$ .

Вентилятор для такой системы представлен на рисунке 5.

Разница в потерях давления не является большой, однако при применении больших по размерам воздуховодов появляются дополнительные затраты на материал и монтаж системы. При применении больших воздуховодов не соблюдаются также пределы рекомендуемых скоростей в ответвлениях

(не менее 5 м/с). С учетом многолетнего опыта эксплуатации объектов с разветвленной системой кондиционирования скоростной режим должен быть согласован, иначе это может повлиять на эффективность эксплуатации системы кондиционирования.



**Рисунок 5** – Технические данные вентилятора, подобранного для системы кондиционирования, рассчитанной по номограммам и таблицам (с пересчетом участков 1, 2, 8)

Одной из важных деталей автоматизированного расчета системы кондиционирования (вентиляции) является то, что программа производит увязку ответвлений только при наличии в них регулирующей арматуры, что не всегда может быть обязательным при расчете по номограммам и таблицам (при невязке ответвлений с главным направлением менее 10 %). Добавление запорной арматуры ведет к удорожанию системы кондиционирования.

Таким образом, различия в расчете с помощью программы и по номограммам и таблицам не существенные, но все же они имеют место быть. Расхождение значений потерь давления между автоматическим и «стандартным» составляет 2,4 %, а при пересчете на диаметры, подобранные в программе – 13 %. Небольшая разница может привести к удорожанию системы, что является нежелательным результатом аэродинамического расчета.

На основании вышперечисленного можно сделать вывод, что расчет в программах является альтернативой расчету по номограммам и таблицам, однако стоит учитывать некоторую погрешность автоматизированных расчётов. На примере системы кондиционирования одного помещения можно сказать, что метод расчета по номограммам и таблицам является более надежным, так как все параметры воздуховодов контролируются непосредственно человеком, а именно, такие как скорость и ее возрастание по ходу движения расчета участков

воздуховодов, потери в местных сопротивлениях, форма поперечного сечения и размер воздуховодов.

По полученным результатам можем составить предварительный расчет стоимости материалов и оборудования системы кондиционирования для двух вариантов.

При расчете с помощью номограмм потери давления по главному направлению составляют 275,77 Па при расходе воздуха 8976 м<sup>3</sup>/ч.

При автоматическом расчете в программе MagiCAD Revit потери давления составляют  $\Delta P = 269,1$  Па при расходе воздуха 8976 м<sup>3</sup>/ч (на основании отчета из MagiCAD Revit).

На данный момент в Беларуси средняя стоимость вентиляционного оборудования составляет:

**Таблица 4** – Средняя стоимость воздуховодов и фасонных частей

Диаметр воздуховода	Средняя стоимость прямолинейного участка, бел. руб. за 1 м.п.	Средняя стоимость фасонного изделия (отводы, тройники, крестовины, редукция), бел. руб. за 1 шт.
200	22,0	16,0
250	27,0	21,0
315	34,0	28,0
400	44,0	38,0
500	77,0	71,0
550	87,0	81,0
630	98,0	92,0

Таким образом, можем рассчитать приблизительную стоимость строительства всей системы кондиционирования на основании двух расчетов, с учетом ответвлений, регулирующей арматуры (воздушных клапанов). Воздухораспределители в расчете учитывать не будем, так как они остаются неизменными в обоих расчетах. Стоимость монтажных работ также принимаем одинаковой для обоих случаев.

Небольшое различие в расчетах аэродинамики приводит к заметному различию стоимости самой системы кондиционирования, а именно на 148,2 бел. руб. или 3,9 %. При этом несколько увеличенные диаметры воздуховодов приводят к нарушению скоростного режима в системе кондиционирования, вследствие чего не соблюдаются пределы рекомендуемых скоростей в ответвлениях (не менее 5 м/с). С учетом многолетнего опыта эксплуатации объектов с разветвленной системой кондиционирования скоростной режим должен быть согласован, иначе это может повлиять на эффективность эксплуатации системы кондиционирования.

Одним из критериев эффективной системы кондиционирования так же являются затраты на ее эксплуатацию. В данном случае для обеих систем кондиционирования подходит одна и та же установка, где расход и потери давления практически одинаковы.

**Таблица 5** – Приблизительная стоимость строительства системы кондиционирования по расчетам, сделанным по номограммам и таблицам

Диаметр d, мм	Название изделия	Количество, шт. (м.п.)	Стоимость одной единицы изделия за шт. (м.п.), бел. руб.	Стоимость, бел. руб.
1	2	3	4	5
200	гофрированный воздуховод	9,66	9,36	90,42
200	стальной навивной воздуховод	12,00	22,00	264,00
250	стальной навивной воздуховод	3,60	27,00	97,20
315	стальной навивной воздуховод	3,60	34,00	122,40
400	стальной навивной воздуховод	3,60	44,00	158,40
500	стальной навивной воздуховод	7,20	77,00	554,40
550	стальной навивной воздуховод	3,67	87,00	318,86
200	фасонное изделие	12	16,00	192,00
250	фасонное изделие	3	21,00	63,00
315	фасонное изделие	4	28,00	112,00
400	фасонное изделие	4	38,00	152,00
500	фасонное изделие	7	71,00	497,00
550	фасонное изделие	6	81,00	486,00
200	воздушный клапан	8	67,23	537,84
Суммарная стоимость, бел. руб.:				3645,51

Таким образом, можно сделать вывод, что использование программ является эффективным и удобным способом расчёта, но следует принимать во внимание некоторые особенности проектирования систем вентиляции. Для большей эффективности стоит проводить расчеты с использованием различных методов аэродинамического расчета.

**Заключение.** Различия в расчете с помощью программы MagiCAD Revit и по номограммам и таблицам не существенные, но все же они имеют место быть. Расхождение значений потерь давления между автоматическим и «стандартным» составляет 2,4 %, а при пересчете на диаметры, подобранные в программе – 13 %. Небольшая разница может привести к удорожанию системы, что является нежелательным результатом аэродинамического расчета. Расчет в программах является альтернативой расчету по номограммам и таблицам, однако стоит учитывать некоторую погрешность автоматизированных расчетов.

Небольшое различие в расчетах аэродинамики приводит к заметному различию стоимости самой системы кондиционирования, а именно  $\delta = 3,9 \%$ .

При этом несколько увеличенные диаметры воздуховодов приводят к нарушению скоростного режима в системе кондиционирования, вследствие чего не соблюдаются пределы рекомендуемых скоростей в ответвлениях (не менее 5 м/с). С учетом многолетнего опыта эксплуатации объектов с разветвленной системой кондиционирования скоростной режим должен быть согласован, иначе это может повлиять на эффективность эксплуатации системы кондиционирования.

**Таблица 6** – Приблизительная стоимость строительства системы кондиционирования по расчетам, сделанным в программе MagiCAD Revit

Диаметр d, мм	Название изделия	Количество, шт. (м.п.)	Стоимость одной единицы изделия за шт. (м.п.), бел. руб.	Стоимость, бел. руб.
1	2	3	4	5
250	гофрированный воздуховод	9,66	13,44	129,83
250	стальной навивной воздуховод	15,60	27,00	421,20
315	стальной навивной воздуховод	3,60	34,00	122,40
400	стальной навивной воздуховод	3,60	44,00	158,40
500	стальной навивной воздуховод	7,20	77,00	554,40
630	стальной навивной воздуховод	3,67	98,00	359,17
250	фасонное изделие	1	21,00	21,00
315	фасонное изделие	4	28,00	112,00
400	фасонное изделие	4	38,00	152,00
500	фасонное изделие	7	71,00	497,00
630	фасонное изделие	6	92,00	552,00
250	воздушный клапан	10	71,43	714,30
Суммарная стоимость, бел. руб.:				3793,70

Одним из критериев эффективной системы кондиционирования также являются затраты на ее эксплуатацию. В данном случае для обеих систем кондиционирования подходит одна и та же установка, где расход и потери давления практически одинаковы. Использование программ является эффективным и удобным способом расчета, но следует принимать во внимание некоторые особенности проектирования систем вентиляции. Для большей эффективности стоит проводить расчеты с использованием различных методов аэродинамического расчета.

#### Список цитированных источников

1. Хрусталеv, Б. М. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование / Б. М. Хрусталеv [и др.] Под ред. Б.М. Хрусталева. – Минск : Дизайн ПРО, 1997. г.п.

2. Руководство по началу работы в программе Revit Autodesk [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://knowledge.autodesk.com>. – Дата доступа: 12.05.2022.
3. Белова, Е. М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях / Е. М. Белова – М. : Евроклимат, 2006. – 640 с.
4. Нестеренко, А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха: учеб. пособие / А. В. Нестеренко. – М. : Изд-во З. «Высшая школа», 1971. – 460 с.
5. Павлов, Н. Н. Внутренние санитарно-технические устройства. Вентиляция и кондиционирование воздуха: справочник проектировщика / Н. Н. Павлов, Ю. И. Шиллер. – М. : Стройиздат, 1992. – Ч.3. – 320 с.
6. Баркалов, Б. В. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях / Б. В. Баркалов, Е. Е. Карпис. – М. : Стройиздат, 1971. – 263 с.
7. Дячек, П. И. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: учебное пособие / П. И. Дячек. – М. : Издательство АСВ, 2017. – 676 с.
8. Ананьев, В. А. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / В. А. Ананьев [и др.] – М. : Евроклимат, 2001. – 416 с.
9. Богословский, В. Н. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: учебник для вузов / В. Н. Богословский, О. Я. Кокорин, Л. В. Петров – М. : Стройиздат, 1985. – 367 с.
10. Кокорин, О. А. Современные системы кондиционирования / О. А. Кокорин. – М. : Изд-во физико-математической литературы. 2003. – 272 с.

**ОЦЕНКА СУЩЕСТВУЮЩИХ И ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ МИКРОКЛИМАТА ДЛЯ МУЗЕЕВ С ОТКРЫТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ГРУНТА НА ПРИМЕРЕ ЗАЛА АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО РАСКОПА МУЗЕЯ «БЕРЕСТЬЕ»**

*П. Ф. Янчилин<sup>1</sup>, Д. В. Федорович<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, БрГТУ, Брест, Беларусь, tgv\_bstu@tut.by

<sup>2</sup>Инженер-конструктор, ЗАО «Оптималсервис», Брест, Беларусь, daryai-vanuk340@gmail.com

**Аннотация**

В данной статье представлены результаты обследования системы воздушного отопления, совмещенного с приточной вентиляцией зала археологического раскопа музея «Берестье». А также представлены результаты расчета и проектирования системы кондиционирования в зале археологического раскопа.

**Ключевые слова:** теплопоступления, расчетный воздухообмен, схема обработки воздуха, воздухораспределение, аэродинамический расчет, центральный кондиционер.

**ASSESSMENT OF EXISTING AND DESIGN FEATURES OF MICROCLIMATE SYSTEMS FOR MUSEUMS WITH AN OPEN GROUND SURFACE ON THE EXAMPLE OF THE HALL OF THE ARCHAEOLOGICAL EXCAVATION OF THE MUSEUM «BERESTYE»**

*P. Yanchilin, D. Fedorovich*

**Abstract**

This article presents the results of an examination of the air heating system combined with the supply ventilation of the hall of the archaeological excavation of the Berestyie Museum. The results of calculation and design of the air conditioning system in the archaeological excavation hall are also presented.

**Keywords:** heat gain, calculated air exchange, air treatment scheme, air distribution, aerodynamic calculation, central air conditioning.

**Введение.** Музей — учреждение, занимающееся сбором, изучением, хранением и экспонированием предметов — памятников естественной истории, материальной и духовной культуры, а также просветительской и популяризаторской деятельностью. Основной задачей таких зданий является сохранение памятников естественной истории, материальной и духовной культуры. Комфортное пребывание людей ставится на второе место. Но даже при таком подходе благоприятное самочувствие людей должно быть обеспечено в полной мере, иначе посещаемость музея будет небольшой.

Долговечная сохранность экспонатов зависит, в основном, от следующих условий:

- поддержание необходимого микроклимата для различных материалов органического и неорганического происхождения;
- поддержание светового режима, исключающего облучение экспонатов инфракрасными и ультрафиолетовыми волнами;
- максимального сокращения агрессивных газов и пыли, поступающих с приточным воздухом;
- понижение подвижности воздуха у поверхностей экспонатов.

Создание требуемых параметров микроклимата в зданиях культовой архитектуры – задача сложная. Самым надежным способом обеспечения долговечности экспонатов является оборудование музеев установками для кондиционирования воздуха – круглосуточное и круглогодичное, создающее оптимальный температурно-влажностный режим.

Необходимые для человека условия внутренней среды в общественных зданиях обеспечиваются с помощью систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

**Материалы и методы.** Методологическая основа исследования состояла из сбора данных, комплексного анализа информации. Исследование проводилось посредством статистической обработки данных, аналитических расчетов, моделирования.

**Результаты и обсуждение.** В зале археологического раскопа музея «Берестье» проводилось обследование системы воздушного отопления, совмещенного с приточной вентиляцией. Данное обследование состояло из визуального осмотра системы, замеров параметров воздуха по периметру раскопа, выявления дефектов и повреждений.

Согласно проектной документации, разработанной Брестским государственным проектным институтом в 1976 году, система отопления и вентиляции для постоянного павильона над законсервированными остатками деревянных построек древнерусского города Берестье представляла собой:

– в зимнее время приток воздуха осуществляется приточной установкой П1. В системе предусмотрены: два центробежных вентилятора (в зимнее время работает один, второй – резервный), электрокалориферы, пластинчатый шумоглушитель, фильтры ячейковые. Раздача воздуха в зале археологического раскопа осуществляется двумя воздуховодами равномерной раздачи. Удаляемый воздух используется для рециркуляции;

– в летнее время приток воздуха частично осуществляется системой П1. В рабочем положении находятся оба вентилятора. Недостающий воздух подается через открытые фрамуги, которые устроены в торцевом остеклении (нижний пояс). Воздухораздача осуществляется четырьмя воздуховодами равномерной раздачи. Удаление воздуха обеспечивается через торцевое остекление (верхний пояс).

В ходе обследования системы было выявлено, что запроектированная система отопления и вентиляции смонтирована не полностью и, следовательно, находится в нерабочем состоянии. Воздухозаборные и распределительные камеры расположены в подвале здания. Каждая камера представляет собой отдельно огражденное строительными конструкциями помещение. В системе присутствуют: камера нагрева воздуха, где установлены калориферы (частично отсутствуют, а оставшиеся находятся в нерабочем состоянии), камера фильтрации, блок шумоглушения с пластинчатым шумоглушителем, вентиляторный блок с установкой двух центробежных вентиляторов (оба находятся в нерабочем состоянии, отсутствует соединительный рукав), три воздухозаборные камеры, а также рециркуляция воздуха. Воздух поступает по камерам с помощью заслонок. Металлические воздуховоды прямоугольного сечения размером 750 x 500 и 950 x 500, последние вмонтированы в строительные конструкции. Два воздуховода не подключены к распределительной камере. Предусмотренный проектом воздухозаборный канал не достроен, о чем свидетельствует акт обследования 1980 года. Воздухораспределительные решетки (находятся в загрязненном состоянии) расположены по трем сторонам раскопа. Проектом предусмотрено, что по всем трем сторонам через решетки будет осуществляться подача воздуха к раскопу. По факту часть из них работает на забор воздуха из помещения [1].

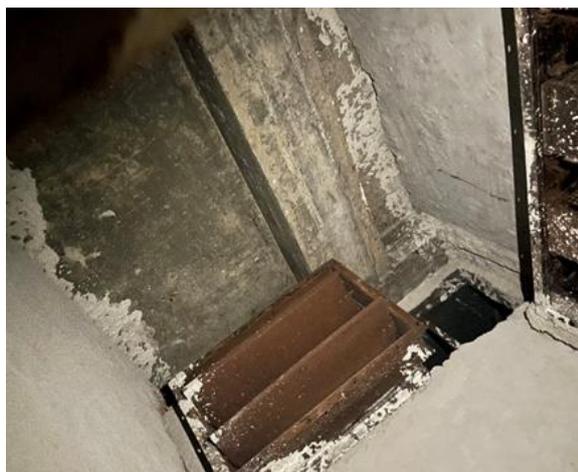
Общее состояние системы П1 на момент обследования характеризуют рисунки 1–4.



**Рисунок 1** – Вентиляторы системы



**Рисунок 2** – Камера нагрева воздуха



**Рисунок 3** – Заслонка с ручным приводом



**Рисунок 4** – Воздуховоды и воздухораспределительные решетки

Замеры параметров микроклимата по периметру раскопа представлены в таблице 1 (температура наружного воздуха составляла + 4°C).

**Таблица 1** – Параметры воздуха в музее «Берестье»

№ п/п	Температура $t_n$ , °C	Относительная влажность $\phi_v$ , %
1	2	3
Зал раскопа: т.1	4,8	66,7
т.2	4,5	73,3
Периметр раскопа: т.1	3,9	74,1
т.2	4,0	76,6
т.3	4,0	75,5
т.4	4,0	79,0
т.5	4,4	78,1
т.6	4,6	75,4

Сравнение с допустимыми параметрами микроклимата произвели по периметру раскопа, где временно пребывают посетители и находится персонал. Показатели не соответствуют нормативным требованиям. В зале раскопа сравнение произвести не представляется возможным из-за отсутствия нормативных параметров микроклимата.

Техническое состояние обследуемой системы характеризуется IV категорией – неработоспособное состояние.

Для достижения требуемых параметров микроклимата в зале археологического раскопа рекомендуется произвести корректировку расчета существующей системы, произвести демонтаж вышедшего из строя оборудования и предусмотреть проектирование новой системы вентиляции с частичным демонтажом существующей.

При проектировании новой системы необходимо учитывать требования, предъявляемые к вентиляции музеев, а также определить требуемые параметры мик-

роклимата музейных помещений, которые зависят от места размещения экспонатов, материала, из которого они изготовлены, условий их хранения. Прежде всего, необходимо учитывать, что такая система является скорее технологичной, чем гражданской. На первом месте стоит забота об экспонатах, их сохранность, а на втором – создание комфортных условий для посетителей и персонала.

В крупных музеях целесообразно устройство центральных или комбинированных систем, если здание располагает необходимыми возможностями для размещения кондиционеров, трассировки транзитных и местных воздуховодов и других элементов данных систем.

Круглогодично и круглосуточно работающие СКВ, как правило, следует совмещать с системами воздушного отопления. В этом случае агрегаты должны резервироваться.

Схему воздухообмена следует организовывать с учетом эффективного использования ассимиляционной способности циркулирующего воздуха и минимальных скоростей воздушных потоков вблизи экспонатов;

Для обеспечения нормируемого уровня звукового давления для музейных помещений и исключения передачи вибрации на строительные конструкции здания вентиляционные системы должны быть оборудованы звукоглушителями, виброоснованиями и другими устройствами. Также в зависимости от вентиляционных систем они должны быть оборудованы соответствующими средствами автоматического регулирования, управления и контроля. Охлаждение приточного воздуха следует осуществлять с помощью одно- либо двухступенчатого испарительного охлаждения воздуха или с помощью естественных источников. Очистку воздуха следует производить с помощью сухих тканевых или бумажных фильтров [2].

При хранении и экспонировании музейных коллекций в помещениях нормируются три климатических параметра: температура воздуха, относительная влажность воздуха и скорость движения воздушных потоков, а также допустимые амплитуды колебаний температуры и влажности воздуха. При этом значения температуры и относительной влажности воздуха взаимосвязаны и должны обеспечить стабильное влагосодержание.

Категорически запрещается делать перерывы в вентиляции и допускать резкие колебания температуры и влажности воздуха в музеях. Важным условием нормализации температурного режима в помещениях музея является плавное изменение температуры. Для более удовлетворительных условий хранения музейных ценностей значения температуры и относительной влажности должны находиться в оптимальном диапазоне значений.

Оптимальные стабильные условия в течение всего года могут быть обеспечены кондиционированием воздуха. Однако при реконструкции зданий музеев не всегда есть возможность обеспечения оптимальных параметров, так как необходимо учитывать состояние конструкций, исторический интерьер и экстерьер, архитектурно-планировочные особенности здания, соображения экономиче-

ского порядка. В таком случае необходимо стремиться к поддержанию допустимых параметров микроклимата. Такие параметры обеспечивает приточно-вытяжная вентиляция [3].

С силу сложности и разнообразия предметов и коллекций, составляющих культурное наследие, очень сложно дать абсолютное определение диапазонов предельно допустимых значений и оптимальных параметров для хранения произведений искусства и предметов, представляющих историческую ценность.

Для определения требуемых параметров микроклимата музейных помещений был произведен литературный поиск.

– Согласно СН 3.02.02-2019 «Общественные здания» (приложение Д, таблица Д.3) в фондохранилище музея расчетная температура воздуха в холодный период года – 16 °С, а кратность воздухообмена в 1 ч – 2 на вытяжку. В выставочном зале расчетная температура должна составлять 18 °С, а кратность воздухообмена – 3 : 3.

– Согласно п.209 [4] температура воздуха в музейных помещениях при комплексном хранении различных материалов должна быть в пределах  $18 \pm 1$  °С. Оптимальные условия относительной влажности при комплексном хранении различных материалов  $55 \pm 5$  %. Безопасные пределы относительной влажности для музеев, не оснащенных кондиционерами, – 50–65 %.

– Согласно п.12.1 [5] кондиционирование воздуха в экспозиционных залах и фондохранилищах должно быть круглосуточное и круглогодичное, обеспечивающее оптимальный температурно-влажностный режим 18–22 °С и относительную влажность  $55 \pm 5$  %. Согласно п.12.4 [5] кратность обмена воздуха рекомендуется принимать: в экспозиционных залах 5–6; в хранилищах 1,5–2; в коллекционном зале 4–6; в лабораториях 10.

– Согласно таблице 1 [6] рекомендуемыми микроклиматическими параметрами для обеспечения оптимальных условий хранения дерева являются: относительная влажность 40–65 %; температура 19–24 °С. Согласно таблице 2 микроклиматическими условиями, предохраняющими материалы от микробиологического воздействия, являются: археологическое дерево – относительная влажность 50–60 %, температура 19–24 °С, максимальный диапазон дневного колебания относительной влажности 2 %, максимальный диапазон дневного колебания температуры 1,5 °С; мокрое дерево – температура 0–4 °С.

– В архивах, лабораториях холодного хранения должна поддерживаться температура воздуха 10–14 °С, относительная влажность воздуха – 30–50 %. Скорость воздуха в музейных помещениях должна находиться в пределах 0,1–0,3 м/с, скорость обдува открыто расположенных экспонатов потоком приточных струй не должна превышать 0,2 м/с. Допустимые значения амплитуды суточных и сезонных колебаний температуры и относительной влажности воздуха в помещении: амплитуда колебаний температуры – суточная  $\pm 2$  °С, сезонная  $\pm 4,5$  °С; амплитуда колебаний относительной влажности воздуха – суточная  $\pm 10$  %, сезонная  $\pm 10$  % [7].

Следует отметить, что все требования к микроклимату для сохранности музейных коллекций должны распространяться только на зону размещения экспонатов.

Основой музея «Берестье» является археологический раскоп. Сложностью в проектировании системы кондиционирования является то, что деревянные постройки размещены непосредственно на почве (рисунок 5).



**Рисунок 5** – Археологический музей «Берестье»

Так как зал раскопа не отделен никаким перекрытием, то воздух, подаваемый в раскоп, будет распределяться по всему зданию. Учитывая эту особенность, было принято запроектировать для археологического раскопа центральную систему кондиционирования воздуха.

Центральная СКВ должна обеспечивать требуемые параметры микроклимата в раскопе.

Для определения параметров микроклимата в зале археологического раскопа необходимо учитывать особенности свойства дерева, из которого изготовлена коллекция. Экспонаты из дерева очень чувствительны к изменениям температуры и влажности воздуха. При уменьшении влажности древесины происходит ее усушка, что приводит к механическим повреждениям и изменению форм. При увеличении влажности изменяются механические свойства древесины, она делается менее прочной и может наступить набухание и гниение дерева. Поэтому очень важно, чтобы температурно-влажностный режим зала раскопа был стабильным.

Проанализировав выше представленные литературные источники, можно сделать вывод, что для данного вида помещения и музейного экспоната нет нормативных параметров микроклимата. Определение требуемого температурно-влажностного режима необходимо выполнять в ходе эксплуатации объекта.

Вариант запроектированной системы кондиционирования для зала археологического раскопа представлен ниже [8].

Необходимо определить расчетные параметры микроклимата:

– расчетные параметры наружного воздуха приняты согласно СН 4.02.03-2019 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» по приложению Г. Для теплого периода года температура наружного воздуха составила 27,2 °С, для холодного – минус 21,0 °С;

– расчетные параметры внутреннего воздуха приняты из проектной документации по этому объекту, разработанной в 1976 году. Температура внутреннего воздуха как для теплого периода года, так и для холодного составила 5 °С.

Для расчета системы кондиционирования произвели расчет теплопоступлений и тепловых потерь. Были учтены теплопоступления от людей, от солнечной радиации и через ограждающие конструкции. Источниками влаговывделений являются люди, а также грунт, на котором размещен главный экспонат музея «Берестье».

Все теплопоступления были рассчитаны в программе «Расчет теплопритоков и теплопоступлений», расчет тепловых потерь был произведен в программе RTI и представлены в таблицах 2, 3.

**Таблица 2** – Теплопоступления и теплотери музея

Наименование помещения	Объем помещения, м <sup>3</sup>	Расчетный период года	Поступления в помещение явной теплоты, Вт			Теплопоступления в помещение, Вт			Избыточная теплота		
			От солнечной радиации	Через ограждающие конструкции	Тепловые потери	Суммарные			Явная		Полная
						Явные	Полные	Скрытые	Вт	Вт/м <sup>3</sup>	
											Вт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Музей «Берестье»	29016	ТП	232856	26868	—	276374	278224	1850	276374	9,52	278224
		ХП	36360		117730	-62500	-61390	-1110	-62500	2,15	-61390

**Таблица 3** – Сводная таблица вредных выделений

Наименование помещения	Объем помещения, м <sup>3</sup>	Расчетный период года	Тепловые избытки		Влаговыделения, кг/ч	Газовые выделения, кг/ч	ε, кДж/кг
			Явные, кДж/ч	Полные, кДж/ч			
1	2	3	4	5	6	7	8
Музей «Берестье»	29016	ТП	276374	278224	2,7	4,63	103045
		ХП	-62500	-61390	2,7	4,63	-22737

При расчете воздухообмена необходимо иметь представление о схеме организации воздухообмена в помещении. Также необходимо знать распределение

параметров воздуха в объеме помещения и расход воздуха, подаваемого и удаляемого из отдельных частей помещения системами местной вентиляции [9].

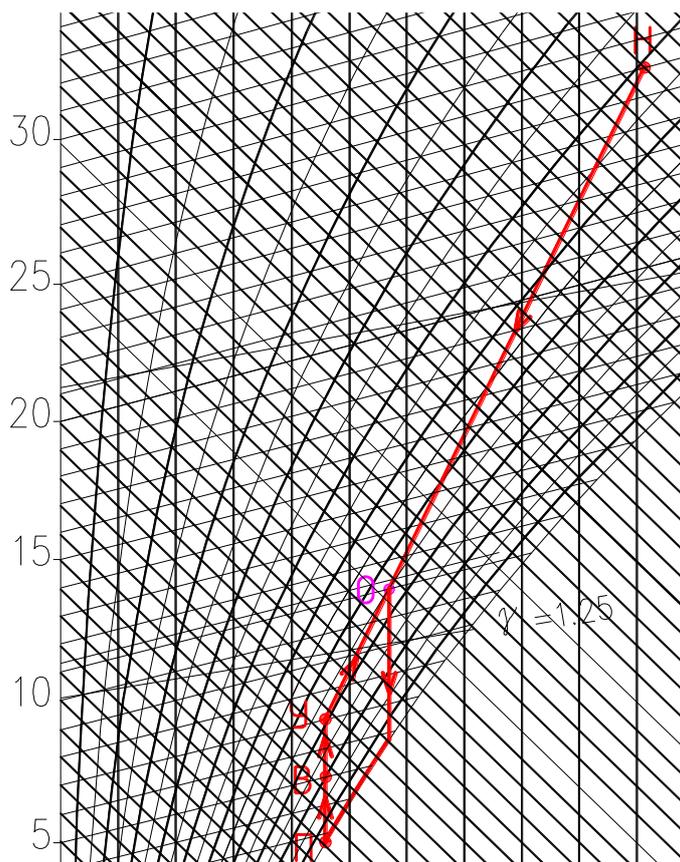
Для определения требуемого воздухообмена воспользуемся способом определения обмена воздуха по кратности. Кратность воздухообмена рекомендуется принимать 1,5–2, согласно литературным данным о музеях.

Площадь раскопа равна 1131,84 м<sup>2</sup>, высота от грунта до перекрытия 4 м.

Тогда требуемый воздухообмен для зала раскопа будет равен 6791 м<sup>3</sup>/ч.

Для рационального использования энергии, экономного использования холода, теплоты, электроэнергии, а также экономии строительной площадки необходимо проанализировать возможность применения схем с регенерацией теплоты удаляемого воздуха, использование первой и второй рециркуляции воздуха, использование схем с байпасом. Вопрос выбора принципиальной схемы обработки воздуха может быть решен в ходе построения на I-d-диаграмме процессов обработки воздуха в кондиционере.

Схемы процессов изменения состояния воздуха в помещении, а при кондиционировании – и при его обработке в приточной установке, должны быть представлены на I-d-диаграмме с учетом избытков полной теплоты и влаговыделений в помещении для всех расчетных периодов года [10].

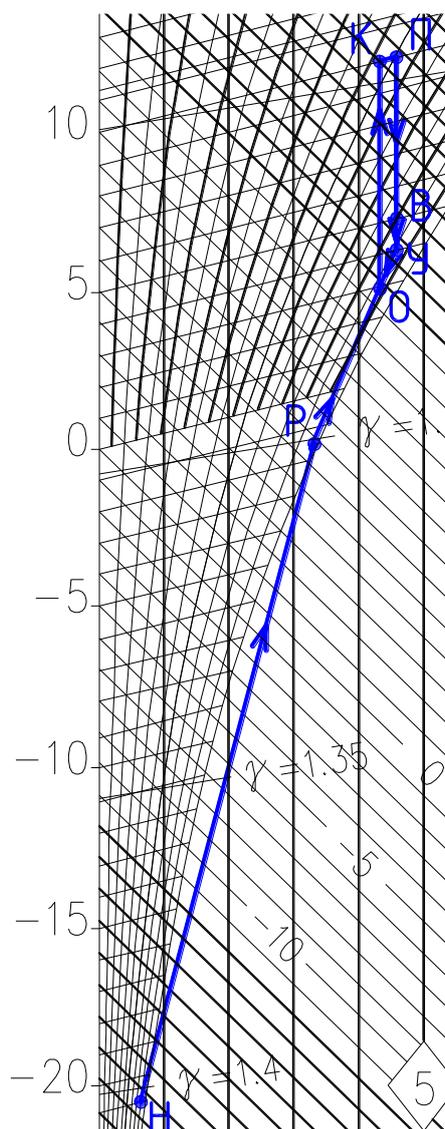


**Рисунок 6** – Процесс обработки воздуха в теплый периода с первой рециркуляцией и охлаждением

После рассмотрения и анализа нескольких вариантов построения процессов обработки воздуха в теплый и холодный период времени, были выбраны наиболее оптимальные.

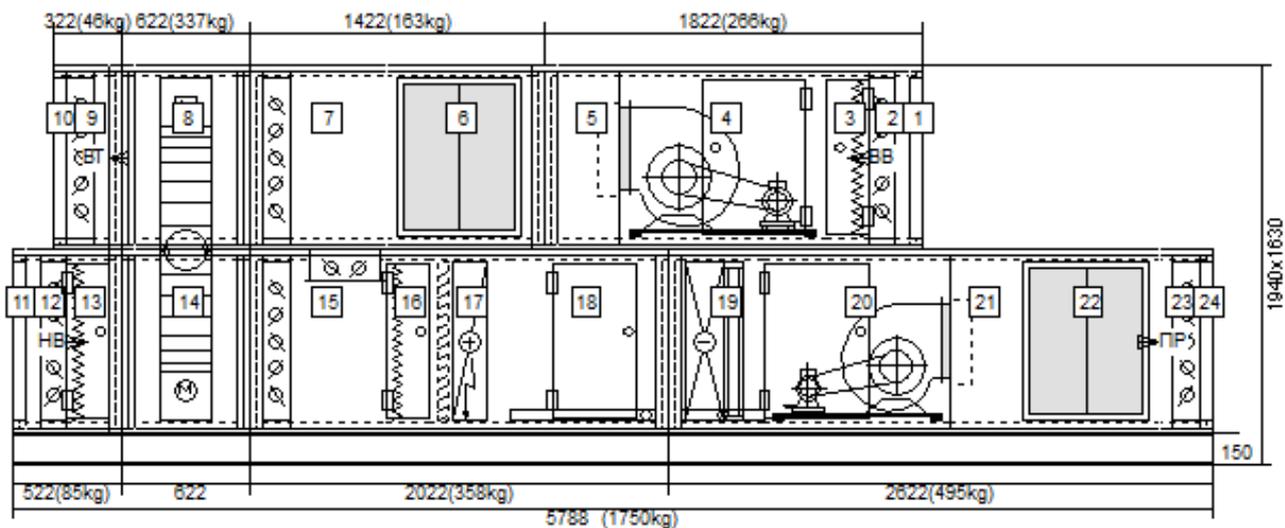
Для теплого периода с наименьшими затратами тепла и воды является процесс обработки воздуха с первой рециркуляцией и охлаждением. Для осуществления данного процесса требуется смешать 3019 кг/ч рециркуляционного и 3772 кг/ч наружного воздуха, а также необходим фреоновый охладитель с мощностью охлаждения 20,7 кВт (рисунок 6).

Для холодного периода года процессом с наименьшими затратами тепла и воды является процесс обработки воздуха с ротационным рекуператором, второй рециркуляцией, нагревом и пароувлажнением. Для осуществления данного процесса требуется смешать 3019 кг/ч рециркуляционного и 3772 кг/ч наружного воздуха, а также необходимы калорифер с мощностью нагрева 11,5 кВт и пароувлажнитель, который увлажняет воздух в количестве 2,72 кг/ч с расходом тепла 1,7 кВт (рисунок 7).



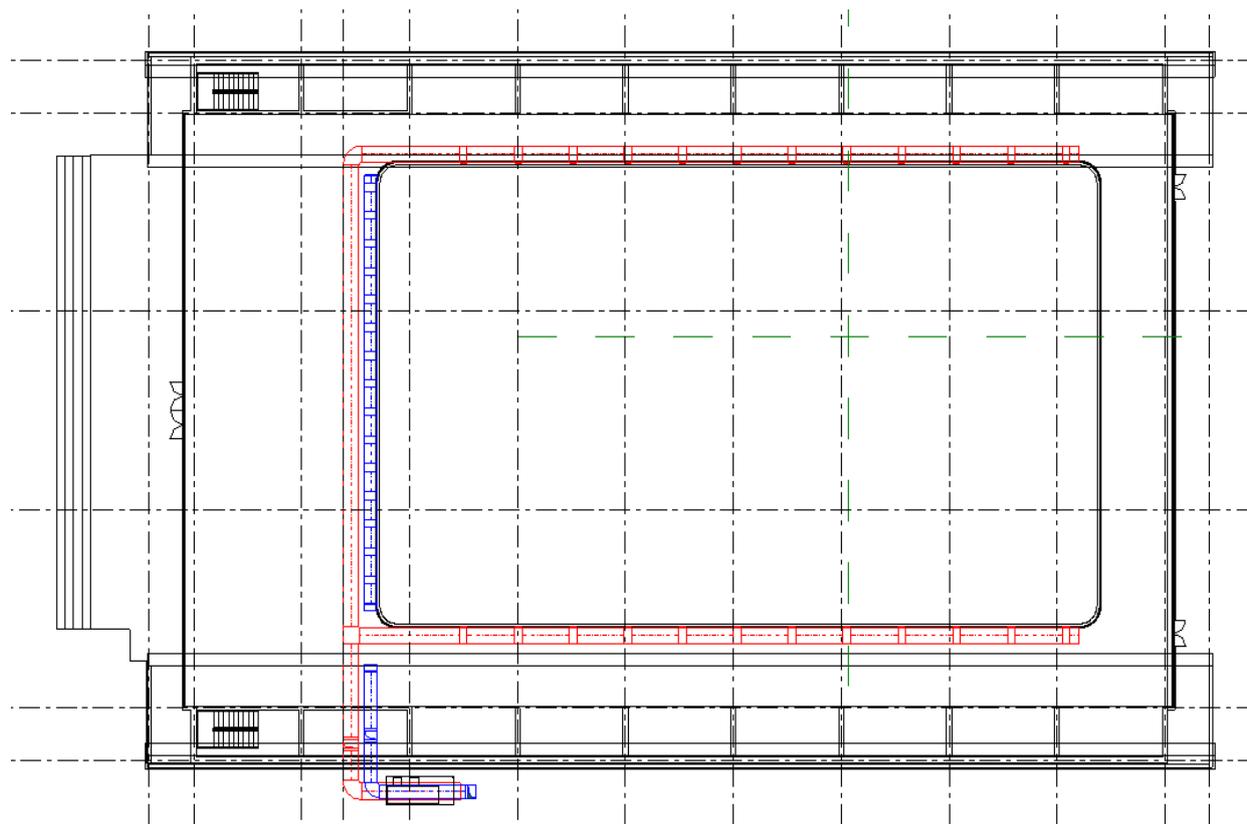
**Рисунок 7** – Процесс обработки воздуха в теплый период с первой рециркуляцией и охлаждением

Исходя из выбранных процессов обработки воздуха произведен подбор центрального кондиционера. Кондиционер выбирается по полной его производительности, с учетом коэффициента запаса 1,1, и комплектуется из отдельных секций. Выбранный кондиционер представлен на рисунке 8.

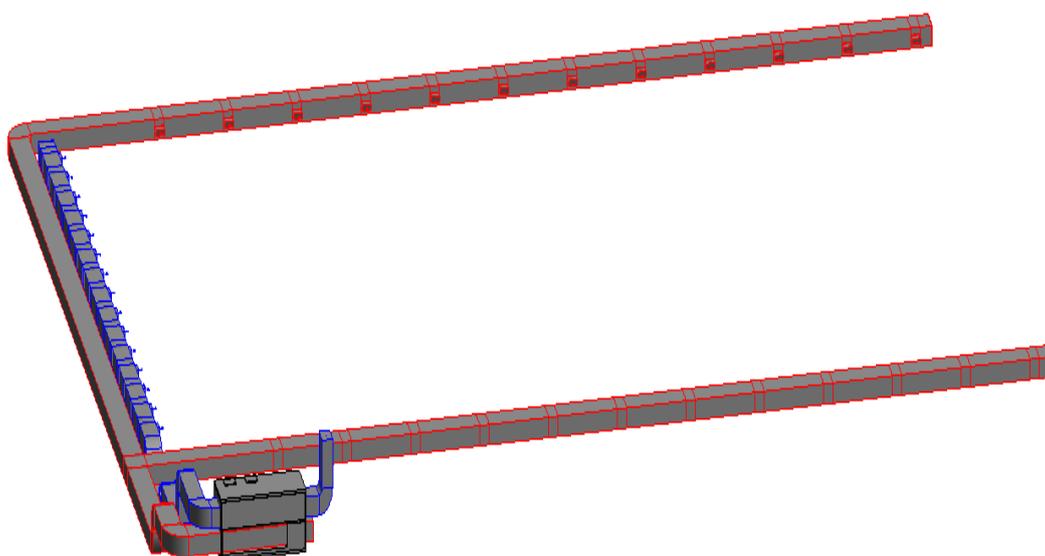


**Рисунок 8** – Центральный кондиционер для обработки воздуха в раскопе

Расчет системы кондиционирования для археологического раскопа, в программе Revit была разработана 3D модель ранее рассматриваемой системы (рисунки 9, 10).



**Рисунок 9** – Вид сверху запроектированной системы кондиционирования



**Рисунок 10** – 3D модель запроектированной системы кондиционирования

**Заключение.** Произведено обследование системы воздушного отопления, совмещенного с приточной вентиляцией. Выявлены дефекты системы: отсутствие некоторых элементов, загрязнение воздуховодов и решеток. Разработаны рекомендации по устранению выявленных дефектов, дана общая оценка существующей системе.

Изучена литература для определения требуемых параметров микроклимата музеев. Необходимый микроклимат для музеев в значительной степени отличается в зависимости от типа коллекций, хранящихся в музее. Требуемые параметры микроклимата для археологического раскопа в свободном доступе найти не удалось. Поиск по нормативным источникам показал, что необходимые параметры воздуха для сохранения такой экспозиции отсутствуют.

Выполнены расчеты теплопоступлений и теплопотерь в здании, расчет требуемого воздухообмена. Произведены расчеты, необходимые для построения на I-d диаграмме нескольких вариантов обработки воздуха для теплого и холодного периодов года. По полученным диаграммам были взяты данные тепловой нагрузки калориферов, фреоновых охладителей и количество влаги, необходимое для работы пароувлажнителя. Рассчитан и подобран центральный кондиционер.

Разработана и запроектирована система кондиционирования воздуха для археологического раскопа, которая обеспечит хранение остаткам деревянных построек древнерусского города Берестье.

Ввиду недостатка данных в нормативной базе по хранению остатков деревянных построек на открытом грунте, разработка систем вентиляции и кондиционирования подразумевает корректировку расчетов в ходе эксплуатации объекта. Для разработки систем, обеспечивающих сохранность экспозициям, был использован опыт ранее запроектированной системы с учетом более современных технологий. Подобранная система является энергосберегающей и энергоэффективной.

### Список цитированных источников

1. Обследование систем микроклимата зала археологического раскопа музея «Берестье»/Янчилин П.Ф., Ключева Е.В., Федорович Д.В.//Проблемы энергетической эффективности в различных отраслях: Материалы научного семинара. Ч. I, 22 апреля 2022 г. – Брест: РУПЭ «Брестэнерго», 2022. – С. 119-123.
2. Музейное хранение художественных ценностей: Практ. пособие. М. : ГосНИИРеставрации, 1995.
3. Томсон Г. Музейный климат. СПб. : Скифия, 2005.
4. Инструкция по учету и хранению музейных ценностей, находящихся в государственных музеях ССР. – М. : Минкультуры СССР. 1985. – 80 с.
5. Рекомендации по проектированию музеев. – М. : Стройиздат. 1988.
6. АВОК №6 статья «Качество воздуха в музеях». – 2009. – 8 с.
7. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях. – М. : Евроклимат. 2006. – 640 с.
8. Определение параметров микроклимата для музея с открытой поверхностью грунта/Федорович Д.В.//Проблемы энергетической эффективности в различных отраслях: Материалы научного семинара. Ч. II, 22 апреля 2022 г. – Брест: РУПЭ «Брестэнерго», 2022. – С. 5–7.
9. Хрусталева Б.М., Копко В.М., Пилюшенко В.П., и др. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование : под ред. Б. М. Хрусталева. – Минск : Дизайн ПРО, 1997 г. п.
10. Дячек, П. И. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: учебное пособие / П. И.Дячек. – М. : Издательство АСВ, 2017. – 676 с.

## РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПОДОГРЕВА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ В ПАРОТУРБИНОМ ЦИКЛЕ

*В. В. Янчук<sup>1</sup>, В. Н. Романюк<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ассистент кафедры ПТЭиТ, БНТУ, г. Минск, Беларусь, ms.vera1675@mail.ru,  
<sup>2</sup> д. т. н., профессор кафедры ПТЭиТ, БНТУ, г. Минск, Беларусь, rvn\_bntu@rambler.ru

### **Аннотация**

Вопрос повышения эффективности использования первичного топлива в ОЭС Беларуси по-прежнему остается актуальным. В данной работе предложен вариант повышения эффективности работы ТЭЦ за счет регенеративного использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), а именно – за счет использования теплоты охлаждения циркуляционной воды. С применением абсорбционного теплового насоса (АБТН) с паровым приводом, на примере цикла паротурбинной установки ПТ-60 показана возможность увеличения электрического КПД станции на 0,90 %, энергетического КПД на 0,55 % и эксергетического КПД на 0,23 % для варианта со снижением выработки электрической энергии и сохранением минимального пропуса пара в конденсатор.

**Ключевые слова:** низкопотенциальные тепловые потоки, ТЭЦ, теплонасосная установка, абсорбционный тепловой насос, регенерация.

## FEEDWATER REGENERATIVE HEATING SYSTEM IMPROVEMENT IN STEAM TURBINE CYCLE

*V. V. Yanchuk<sup>1</sup>, V. N. Romaniuk<sup>2</sup>*

### **Abstract**

Improvement of primary energy source efficient use is still relevant for Belarussian power system. This paper describes a possibility of CHP efficiency growth by secondary energy sources regenerative use, in particular, using the heat of circulating cooling water. The use of an absorption heat pump with a steam drive for PT-60 steam turbine type shows rise of the electrical efficiency by 0,9 %, energy efficiency by 0,55 % and exergy efficiency by 0,23 % for the case with electrical capacity decrease and maintenance of a minimum steam pass to condenser.

**Keywords:** low-grade heat flows, CHP, heat pump, absorption heat pump, regeneration.

**Введение.** Основным первичным энергоресурсом в Беларуси как в энергетическом, так и в промышленном секторе является природный газ (ПГ). С 2020 по 2021 год его доля в приходной части энергобаланса ОЭС Беларуси снизилась с 96 [1] до 84 % (рисунок 1), что связано, прежде всего, с вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС. В последующем, доля ПГ в приходной части энергобаланса

энергосистемы будет уменьшаться и при выводе первого и второго блоков Белорусской АЭС на полную мощность составит 57 %, т. е. природный газ по-прежнему останется основным энергоносителем [2], что требует дальнейших работ по снижению его потребления и повышению энергетической безопасности Республики Беларусь.

Основное количество электроэнергии в ОЭС Беларуси вырабатывается на ТЭС, в частности, на паротурбинных ТЭЦ и КЭС. Значительное количество энергии на ТЭС рассеивается в окружающую среду вместе с циркуляционной водой конденсатора, отходящими дымовыми газами и системой охлаждения генератора.

Вместе с тем часть низкотемпературных тепловых ВЭР возможно использовать как для смежных технологий предприятий промышленного узла, так и непосредственно внутри тепловой схемы. Но если утилизация тепловых ВЭР на предприятиях смежного промузла является внешним энергоиспользованием, то второй вариант, связанный с регенеративным использованием тепловых потоков непосредственно на ТЭЦ, т. е. внутри системы, образующей тепловые ВЭР, термодинамически более эффективен и потому предпочтителен.

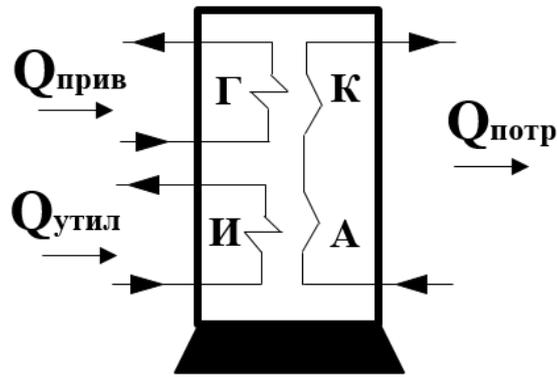
В работах различных авторов приводятся решения, направленные на дополнительный подогрев сетевой воды ТЭЦ за счет ВЭР [3–7], что показывает рост эффективности использования первичного топлива до 2,5 %. Также имеются решения для регенеративного их использования применительно к ТЭС конденсационного типа [8, 9] с повышением эффективности станции до 0,9 %.

В данной работе будет рассмотрен вариант регенеративного использования ВЭР в тепловой схеме ТЭЦ. Наиболее распространенным типом турбоагрегата в ОЭС Беларуси является ПТ-60 и его версии (ПТ-65, ПТ-70 и ПТ-80).

Следовательно, в первую очередь следует рассмотреть возможность и эффективность регенеративного использования низкопотенциальных сбросных тепловых потоков применительно к данному типу турбоагрегатов. Особый интерес представляют Гродненская ТЭЦ-2, Мозырская и Новополоцкая ТЭЦ, на которых имеет место значительный невозврат конденсата производственного отбора [10].

**Материалы и методы.** Для реализации описанного решения принимаем применение абсорбционного теплового насоса (АБТН) (Рисунок 3), для привода которого в контексте данной статьи будет рассмотрен пар из отборов паровой турбины.

В цикле паровой турбины ПТ-60 имеется три технически возможных варианта источника пара на привод АБТН, которые обеспечивают работоспособность данного решения: пар из отбора на ПНД-3 (давление 3,4 ата), из отбора на ПНД-4 (давление 6,0 ата) и из отбора на деаэратор (после дросселирования давление 6,0 ата).



( $Q_{\text{потр}}$  – отпускаемый поток теплоты,  $Q_{\text{прив}}$  – высокопотенциальный поток теплоты на привод ТН,  $Q_{\text{утил}}$  – утилизируемый поток теплоты, Г – генератор, И – испаритель, А – абсорбер, К – конденсатор)

**Рисунок 3** – Структура потоков АБТН

В качестве нагреваемого потока (потока потребления теплоты АБТН) наиболее подходит поток непосредственно подпиточной воды, восполняющей невозврат конденсата производственного отбора.

В классической схеме данный поток поступает на ТЭЦ с температурой 5–20 °С, а после блока водоподготовки его температура составляет величину порядка 35 °С, при этом, далее подмешивается к потоку основного конденсата. Расход подпиточной воды зависит от процента возврата конденсата и значительно отличается для каждой конкретной станции, что, в свою очередь, обусловлено особенностями технологии потребителей, для которых отпускается пар промышленного отбора.

В качестве утилизируемого потока используют потоки с низкими температурами, которые нельзя использовать напрямую и для паротурбинных ТЭЦ. Это прежде всего циркуляционная вода системы охлаждения конденсатора паровой турбины, температурный график которой принят 25/20 °С.

Эффективность модернизации ТЭЦ оценим на основании электрического КПД  $\eta_{\text{эл}}$ , энергетического КПД  $\eta_{\text{эн}}$  и эксергетического КПД  $\eta_e$ , которые соответственно рассчитываются:

$$\eta_{\text{эл}} = \frac{W_{\text{ээ}}}{Q_{\text{топл}} - Q_{\text{то}} - Q_{\text{но}}}, \quad (1)$$

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{W_{\text{ээ}} + Q_{\text{то}} + Q_{\text{но}}}{Q_{\text{топл}}}, \quad (2)$$

$$\eta_e = \frac{\sum E''}{\sum E'} = \frac{E_{\text{ээ}} + E_{\text{ТЭ}}}{E_{\text{топл}}}, \quad (3)$$

где  $W_{ээ}$  – электрическая выработка турбоустановки, ГДж/ч,  
 $Q_{то}$  – тепловая нагрузка теплофикационного отбора, ГДж/ч,  
 $Q_{но}$  – тепловая нагрузка производственного отбора, ГДж/ч,  
 $Q_{топл}$  – мощность потока топлива, ГДж/ч,  
 $E_{ээ}$  – эксергия электрической энергии, ГДж/ч,  
 $E_{тэ}$  – эксергия отпускаемой тепловой энергии (в теплофикационном и производственном отборах), ГДж/ч,  
 $E_{топл}$  – эксергия потока топлива, ГДж/ч.

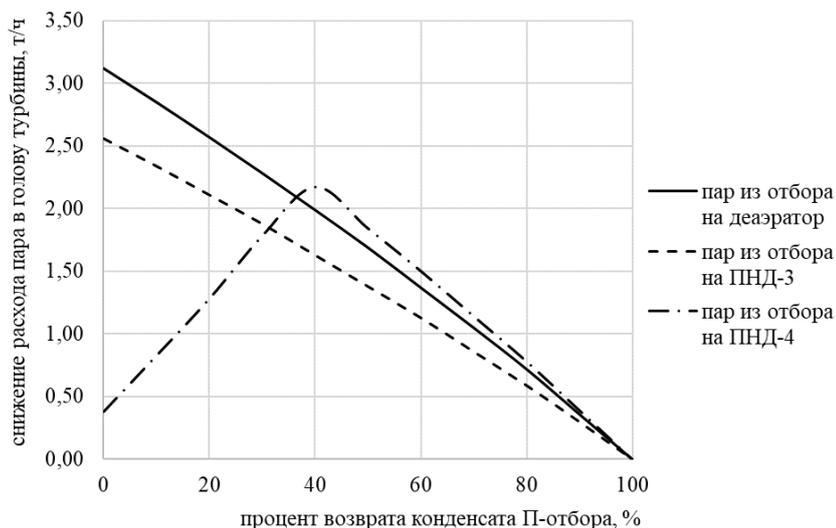
В качестве функции цели, при оптимизации решения задачи, возможны также три варианта: увеличение выработки электрической энергии при сохранении расхода пара на турбину, сохранение электрической мощности установки при сокращении подачи пара в голову турбины или сохранение минимального пропуска пара в конденсатор с одновременным снижением расхода острого пара и снижением выработки. Во всех случаях тепловые нагрузки отопительного и промышленного отбора сохраняются. В процессе эксплуатации возможен переход от одного варианта функции цели к другому, так как изменение расходов пара по вариантам находится в пределах диапазона регулирования.

**Результаты и обсуждение.** Для каждого из трех описанных выше вариантов в результате модернизации рассматриваемые показатели эффективности возрастают и зависят, кроме всего прочего, от процента невозврата конденсата.

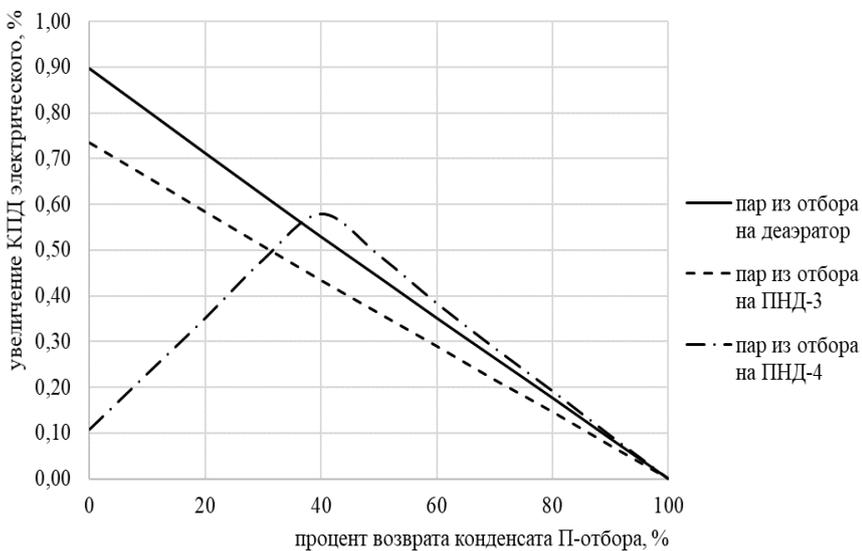
И в предельном случае, для варианта с полным невозвратом конденсата в тепловую схему, рост электрического КПД оказывается наибольшим для варианта с сохранением расхода пара в голову турбины и увеличением выработки электроэнергии, и составляет до 1 %. Рост энергетического КПД показывает максимум для варианта с сохранением пропуска пара в конденсатор и составляет 0,54 %.

Вариант модернизации следует выбирать в соответствии с текущими условиями в энергосистеме и в зависимости от показателей работы конкретной электростанции. В условиях пуска Белорусской АЭС предпочтительным будет вариант со снижением выработки электрической мощности.

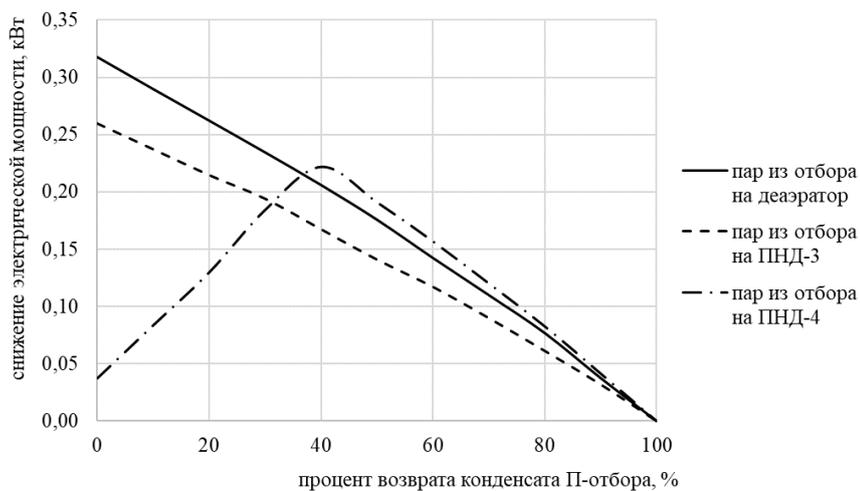
При этом, как известно, эффективность выработки электрической энергии в последних ступенях паровых турбин невысока, поэтому следует выбирать вариант с сохранением минимального расхода пара в конденсатор, что для турбин с уплотненной диафрагмой составляет 12 т/ч. Далее приведены графики зависимости снижения расхода пара в голову турбины (Рисунок 4), увеличения электрического КПД (рисунок 3), снижения электрической мощности турбоустановки (Рисунок 6) и увеличения энергетического КПД (Рисунок 7) – от процента возврата конденсата производственного отбора в цикл для данного варианта.



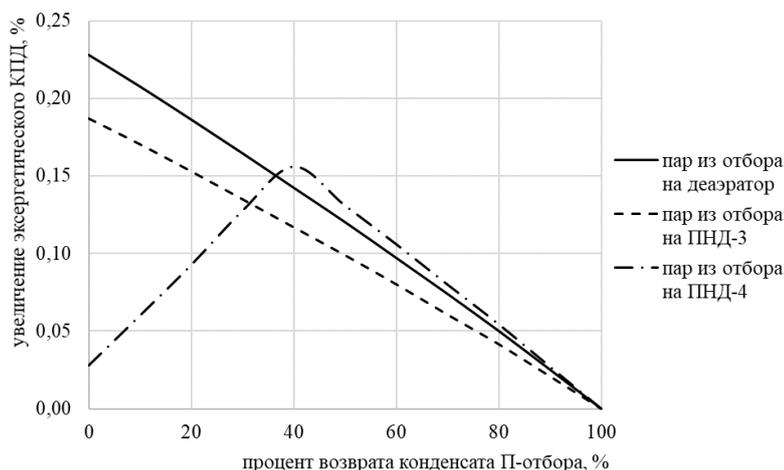
**Рисунок 4** – Снижение расхода пара в голову турбины за счет установки АБТН



**Рисунок 5** – Рост электрического КПД за счет установки АБТН



**Рисунок 6** – Снижение электрической мощности турбоустановки за счет установки АБТН



**Рисунок 7** – Увеличение эксергетического КПД станции за счет установки АБТН

### **Заключение.**

1. Использование потенциала низкотемпературных тепловых ВЭР (теплоты охлаждения циркуляционной воды) для подогрева подпиточной воды требует включения в тепловую схему ТЭЦ теплового насоса абсорбционного типа и позволяет получить положительные результаты.

2. Регенеративное использование сбросных низкотемпературных тепловых потоков на ТЭЦ позволяет расширить систему регенеративного подогрева питательной воды и повысить эффективность использования первичных энергоресурсов. При этом в результате модернизации возможно использовать и изменять в ходе работы функции цели при неизменном техническом воплощении:

2.1. увеличивать выработку электрической энергии за счет снижения расхода пара на подогрев питательной воды в деаэракторе. Прирост мощности с сохранением расхода острого пара в пределе составит 1,15 МВт, при этом электрический КПД увеличится на 1,05 %;

2.2. сохранять электрическую мощность неизменной при снижении расхода пара в голову турбины. Электрический КПД возрастает в пределе на 0,92 %, энергетический КПД – 0,52 %;

2.3. снижать выработку электроэнергии с сохранением минимального пропуса пара в конденсатор 12 т/ч. Для турбоустановки ПТ-60 увеличение электрического КПД в этом варианте в пределе составляет 0,82 %, при этом энергетический КПД увеличивается на 0,54 %. Электрическая мощность турбоустановки снижается на 0,32 МВт.

### **Список цитированных источников**

1. Our world in data/ Electricity mix [Electronic resource]. – Mode access: <https://ourworldindata.org/electricity-mix#fossil-fuels-what-share-of-electricity-comes-from-fossil-fuels>. Date access: 28.12.2022.
2. Хрусталеv, Б. М. Расширение энергосберегающей базы в условиях централизованного теплоснабжения и доминирования энергоемких технологий / Б. М. Хрусталеv, В. Н. Романюк // Энергоэффективность. – 2017. – № 12. – С. 20–27.
3. Zhang, H. S. Performance analysis of the coal-fired power plant with combined heat and power (CHP) based on absorption heat pumps / H. S. Zhang,

- Н. В. Zhao, Z .L. Li // Journal of the Energy Institute. – 2016. – № 89. – P. 70–80.
4. Tianle, Hu. Simulation research on a variable-lift absorption cycle and its application in waste heat recovery of combined heat and power system / Hu Tianle, Xie Xiaoyun, Jiang Yi // Energy/ – 2017. – № 140. –P. 912–921.
5. Шидловская, Д. К. Применение абсорбционных тепловых насосов в тепловой схеме турбоустановки Т-180/210-130 / Д. К. Шидловская, Г. Д. Седельников // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 3. – С. 270–271.
6. Pashka, V. Exergy method in combined system of heat supply thermal power station with district's heat pump / V. Pashka // Ifost. – 2013. –№ 2. – P. 485–487.
7. Романюк, В. Н. Абсорбционные тепловые насосы в тепловой схеме ТЭЦ для повышения ее энергетической эффективности / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина., А. А. Бобич. и др. // Энергия и менеджмент. – 2013. – № 1. – С. 14–19.
8. Янченко, И. В. Влияние абсорбционного теплового насоса на тепловую экономичность ТЭС и АЭС : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / И. В. Янченко. – Новочеркасск, 2015. – 180 л.
9. Курнакова, Н. Ю. О возможности повышения энергоэффективности тепловой схемы ТЭС с применением теплового насоса / Н. Ю. Курнакова, А. В. Нуждин, А. А. Волохонский // Вестник ИрГТУ. – 2018. – № 7. – С. 114–122.
10. Янчук, В. В. Повышение эффективности действующих тепловых электрических станций в современных условиях / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – № 6. – С. 511–523.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Глинская О. С.</b> Оплата труда и организация рационального использования электроэнергии на предприятии .....	3
<b>Гордеев А. А., Пазушкина О. В., Ханова А. Р.</b> Сравнительный анализ эксплуатационных затрат при выборе запорной арматуры на сетях газораспределения .....	9
<b>Джумаев А. Я.</b> Рациональное использование энергии в экспериментальном доме .....	15
<b>Каперейко Ю. В.</b> Учет влияния различных факторов влияния на теплопотери зданий при проектировании и эксплуатации систем водяного отопления .....	25
<b>Латышев О. Ю., Латышева П. А., Радаэлли М., Луизетто М.</b> Совокупность проектов по энергосбережению международной Мариинской академии в Дубае .....	34
<b>Макаров И. Н., Юнусов Э. С., Пазушкина О. В., Марцев Ю. П.</b> Модернизация пунктов редуцирования газа при эксплуатации сетей газораспределения .....	41
<b>Мешик О. П., Борушко М. В.</b> Информационное обеспечение гелиоэнергетического кадастра Республики Беларусь (на примере Бреста) .....	47
<b>Назаров С., Рахимов М., Аннабердиев Ш.</b> О решении задачи оптимального конструирования круговой арки .....	52
<b>Новосельцев В. Г., Каперейко Ю. В.</b> Обеспечение оптимальной работы систем водяного отопления .....	60
<b>Новосельцев В. Г., Новосельцева Д. В., Лукаш В. В.</b> Обеспечение авторитетов термостатических клапанов в системе водяного отопления, не соответствующей проекту .....	72
<b>Овулягулыев А. О., Шамыев Д. Г., Ейебердыева Т. К.</b> Применение аккумулирующих устройств в электрических системах, использующих возобновляемые источники энергии .....	82
<b>Оразбердиева М. Р., Джумадурдыева Г. Я.</b> Сравнительная оценка сырьевой базы биоэнергетики в Туркменистане .....	87
<b>Пухкал В. А., Петров М. М.</b> Утилизация теплоты в приточно-вытяжных установках с тепловым насосом .....	94
<b>Суворов А. А., Иванов Ю. А.</b> Расчёт вентиляции МКД с использованием Epanet и Ansys .....	103
<b>Черноиван Н. В.</b> К вопросу рационального использования тепловой энергии на отопление жилых зданий .....	111

<b>Шешко Н. Н., Шпендик Н. Н., Касперович Д. А.</b> Мультифизическое моделирование конечно-элементных задач инженерных сетей .....	118
<b>Юницкий А. Э., Першай Н. С., Арнаут С. А.</b> Использование электрогидроудара в технологии приготовления водугольного топлива .....	126
<b>Яловая Н. П., Дордюк Ю. С., Яловой П. С.</b> О применении древесно-торфяных отходов в качестве древесного компоста.....	135
<b>Янчилин П. Ф., Каперейко Ю. В.</b> Анализ особенностей аэродинамического расчета системы кондиционирования с помощью специализированных программ.....	141
<b>Янчилин П. Ф., Федорович Д. В.</b> Оценка существующих и особенности проектирования систем микроклимата для музеев с открытой поверхностью грунта на примере зала археологического раскопа музея «Берестье» .....	152
<b>Янчук В. В., Романюк В. Н.</b> Развитие системы регенеративного подогрева питательной воды в паротурбином цикле .....	165

Научное издание

**ES&ES-2023**

**«Эффективность инженерных систем  
и энергосбережение»  
(«Efficiency of engineering systems  
and energy saving»)**

**Сборник статей  
Международной научно-практической конференции  
19-20 октября 2023 года**

*Текст печатается в авторской редакции,  
орфографии и пунктуации*

Ответственный за выпуск: Новосельцев В. Г.  
Редактор: Митлошук М. А.  
Компьютерная вёрстка: Северянин П. В.

---

ISBN 978-985-493-601-7



Издательство БрГТУ.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/235 от 24.03.2014 г., № 3/1569 от 16.10.2017 г.  
Подписано к печати 12.10.2023. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub> Бумага «Performer». Гарнитура «Times New Roman».  
Усл. п. л. 10,23. Уч. изд. л. 11. Заказ № 1180. Тираж 30 экз.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.