ЭНЕРГО СБЕРЕЖЕНИЕ

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Ежемесячный производственно-технический журнал

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

6 Июнь 2020

Издается с августа 1944 года

Москва, НТФ “Энергопрогресс”

СОДЕРЖАНИЕ

Проекты и исследования

Анучин А. С., Ильин Г. Г, Дорожкин А. А. Предлагаемые технические решения для реализации автономной системы диспетчеризации природоохранных водных объектов и объектов ЖКХ 2

Шихин В. А., Абд-Эльрахим А. К., Павлюк Г. П. Постановка оптимизационной задачи при проектировании мультиагентной изолированной микроэнергосистемы 13

Власова Е. П., Хмара Г. А., Махмутова В. Р. Модели процессов передачи цифровых сигналов по различным протоколам МЭК 61850 22

Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю., Шелгинский А. Я. Моделирование теплообмена в капиллярно-пористых покрытиях в энергоустановках 31

Гашо Е. Г., Бебко Д. А., Кондрахов В. А. Энергетические проблемы “анклава” и пути их решения 39

Экономия энергетических ресурсов

Кожевников В. А., Попов С. К., Яковлев И. В. Эффективность применения теплогенераторов на отработанных нефтепродуктах 44

Хромченков В. Г., Мурашов Л. М., Жигулина Е. В., Яворовский Ю. В. Особенности применения низкопотенциального пара в системах теплоснабжения 53

© НТФ “Энергопрогресс”, “Промышленная энергетика”, 2020 г.

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

DOI 10.34831/EP.2020.95.86.008

Предлагаемые технические решения для реализации автономной системы диспетчеризации природоохранных водных объектов и объектов ЖКХ

Анучин А. С., доктор техн. наук, Ильин Г. Г., аспирант
НИУ "МЭИ", Москва

Дорожкин А. А., генеральный директор
ООО "АКВА+", Москва

В связи с активным развитием городской застройки необходимы новые требования к инфраструктуре водоснабжения и водоотведения. Эти требования направлены на повышение надёжности и соответствия экологическим стандартам. При этом ключевыми задачами являются диспетчерский контроль и управление сетями водоснабжения и водоотведения, а также контроль качества воды, подаваемой потребителям, и экологический мониторинг стоков в природные водные бассейны. Предложены технические решения для реализации систем диспетчеризации сетей водоснабжения и водоотведения, а также природоохранных водных объектов.

Ключевые слова: система диспетчеризации; городская система водоснабжения; городская система водоотведения; преобразователь напряжения.

По мере развития городской инфраструктуры необходимость в системах удалённого контроля разветвленного водоснабжения или водоотведения, а также мониторинга качества воды в удалённых точках, становится всё более востребованной. В связи с этим увеличивается спрос на реализацию этих систем.

Большинство точек мониторинга удалены или труднодоступны для подвода и организации кабельных трасс либо удалены от инфраструктуры. В настоящее время такие системы работают за счёт аккумуляторных батарей. Но автономное электроснабжение на платформе аккумуляторных батарей имеет недостаток: их необходимо регулярно заряжать и периодически обслуживать, т. е. извлекать из камер, что существенно увеличивает экономические затраты на поддержание таких систем в рабочем состоянии. Немаловажной негативной экологической проблемой является также необходимость утилизации элементов питания. Таким образом, важен поиск технического решения по созданию распределённых систем диспетчерского контроля, работающих в автономных условиях при минимальных затратах.

Формирование целей и функций автономной системы диспетчеризации объектов водоснабжения

Система городского водоснабжения представляет собой сложное инженерное решение [1], упрощенная принципиальная схема которого представлена на рис. 1. Она представляет собой сеть резервированных трубопроводов *9*, в которые подаётся вода из очистных сооружений водоподготовки *1 – 8*. Далее вода поступает на станции подкачки (насосные станции III-го подъёма) или в водонапорные башни *10*. От станций подкачки вода подаётся в магистральные трубопроводы *11*, из которых она поступает в распределительные трубопроводы *12*. Непосредственно к потребителю *14* вода поступает по общедомовым трубопроводам *13*.

Для обеспечения доступа к трубопроводам и оборудованию сетей водоснабжения уста-

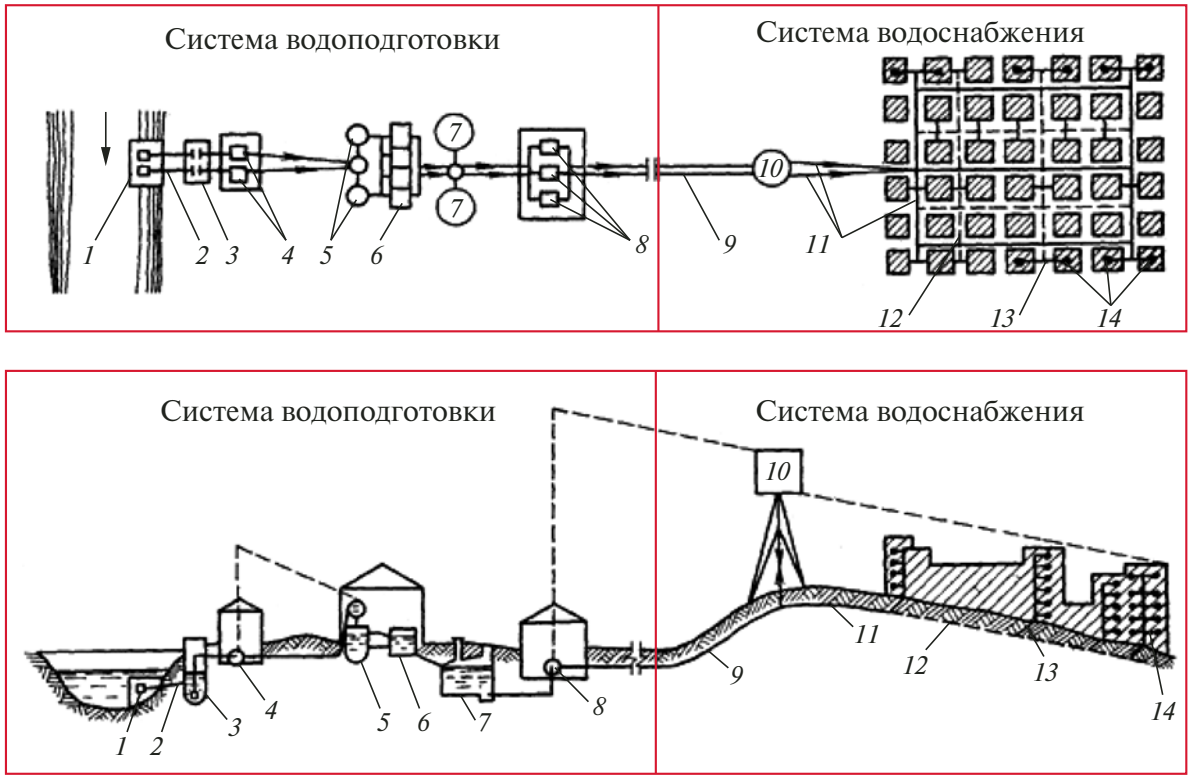


Рис. 1. Принципиальная схема системы водоподготовки и водоснабжения:

1 — водоприёмник; *2* — самотёчный трубопровод; *3* — береговой колодец; *4* — насосная станция I-го подъёма; *5* — отстойники; *6* — фильтры; *7* — резервуары чистой воды; *8* — насосная станция II-го подъёма; *9* — водоводы; *10* — водонапорная башня; *11* — магистральные трубопроводы; *12* — распределительные трубопроводы; *13* — домовые водоводы; *14* — потребители

навливают водопроводные колодцы и камеры (рис. 2). Это круглые или прямоугольные (квадратные) подземные сооружения из железобетона или кирпича. Габаритные размеры камер определяются диаметрами проходящих через них трубопроводов и размерами трубопроводной арматуры, устанавливаемой в камере.

По функциональному назначению колодцы подразделяются на смотровые и переключающие.

Смотровые колодцы (рис. 3) — это колодцы контроля узловых точек системы (ответвлений, поворотов или пересечений труб с участками, подверженными протечкам: соединений с фланцами, муфтами и др.).

Переключающие, регулирующие колодцы (рис. 4) обеспечивают беспрепятственный доступ к управляющей арматуре для регулирования направления и мощности потоков, доступ к контрольно-измерительным приборам (КИП), установленным в сетях водоснабжения, а также доступ для осуществления дренирования или приёма воды при аварийных ситуациях и запланированном её сливе.

Исходя из высоких требований по бесперебойному водоснабжению и санитарных

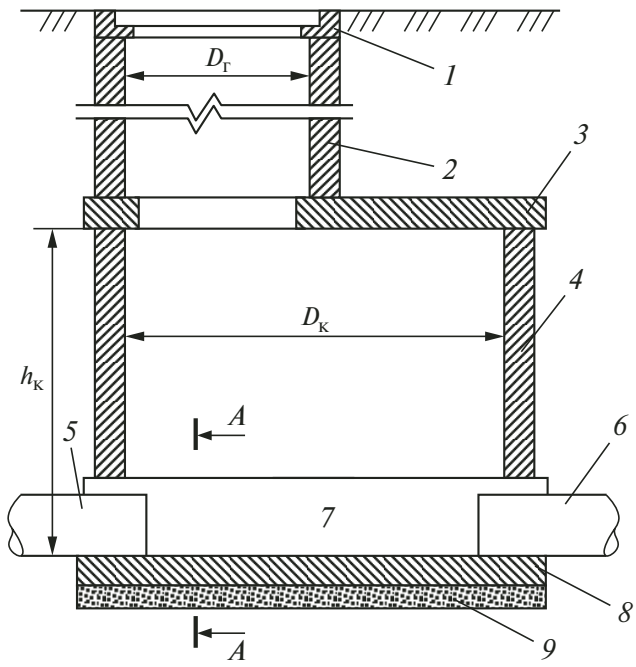


Рис. 2. Чертеж колодца:

1 — люк с крышкой; *2* — горловина колодца; *3* — плита перекрытия; *4* — рабочая камера; *5* — подводящая труба; *6* — отводящая труба; *7* — открытый лоток; *8* — плита основания; *9* — песчаная подготовка

Рис. 3. Общий вид смотрового колодца

Рис. 4. Общий вид переключающего колодца

требований [2], мониторинг водопроводных сетей заключается в контроле следующих параметров: давления, расхода, качества воды (мутность, остаточный хлор).

На рис. 5 представлена функциональная схема системы диспетчерского контроля и управления объектами городской системы водоснабжения, которая выполняет следующие функции:

дистанционный контроль параметров объекта: давления, расхода, показателей качества воды;

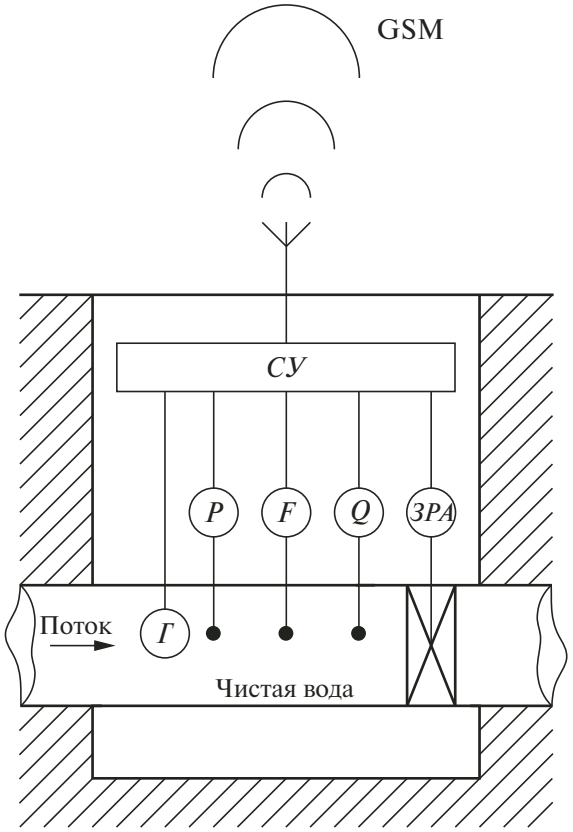


Рис. 5. Функциональная схема системы диспетчерского контроля и управления объектов городской системы водоснабжения:
СУ — система управления; *P* — датчик давления; *F* — датчик расхода/потока; *Q* — датчик контроля качества воды; *ЗРА* — запорно-регулирующая арматура; *Г* — гидрогенератор

дистанционный контроль и управление регулирующей и запорной арматурой.

Целями системы являются:

дистанционная передача данных о состоянии исполнительных механизмов (ИМ) и показаний КИП в центральный диспетчерский пункт (ЦДП) для мониторинга параметров объекта;

формирование отчётов в виде графиков и таблиц за определённый период времени (минуту, час, сутки, месяц, год);

надёжное автономное электропитание системы диспетчеризации, контрольно-измерительных приборов и исполнительных механизмов.

Автономное электропитание для объектов холодного и горячего водоснабжения должно обеспечивать систему необходимой электрической мощностью, должно быть долговечным и не требовать постоянного обслуживания. С этой целью предлагается использовать автономные источники электроэнергии, доступные на таких объектах. В качестве автономных источников могут быть использова-

ны: энергия потока воды в трубопроводе [3 – 5], энергия механических вибраций трубопровода [6, 7], тепловая энергия [8, 9].

Формирование целей и задач автономной системы диспетчеризации объектов водоотведения

Система водоотведения представляет собой комплекс сооружений и устройств, предназначенных для организованного сбора, отведения, перекачки и обработки сточных вод. По характеристике [12] сточные воды разделяются на бытовые, технические, дождевые.

Бытовые сточные воды: воды, поступающие из жилых домов, бань, гостиниц, прачечных, столовых и других общественных и административных зданий, а также из бытовых помещений промышленных и специальных сооружений. Бытовые сточные воды содержат крупные нерастворённые, частично растворённые, либо полностью растворённые в воде вещества органического или минерального содержания. **Очистка** этих сточных вод перед выбросом в водосток **обязательна**.

Технические сточные воды: воды, используемые в системах охлаждения и кондиционирования инженерных сооружений различного назначения, в автопарках, ремонтных мастерских, а также в технологических процессах производства и ремонта. Данные сточные воды загрязнены различными примесями органического, химического и минерального происхождения. **Очистка** этих сточных вод перед выбросом в водосток **обязательна**.

Дождевые (атмосферные, ливнёвые) сточные воды: воды, образующиеся при выпадении осадков и смыва загрязнений с территории объектов. Характер их загрязнений определяется степенью загрязнения осадков и санитарно-эпидемиологическим состоянием территории. Они могут содержать различные примеси биологического, бактериологического и минерального происхождения. **Очистка** этих сточных вод перед сбросом в водосток **определяется степенью загрязнения**.

В зависимости от способа отведения сточных вод системы водоотведения подразделяются на общесплавную, раздельную, полураздельную, комбинированную или вывозную.

В общесплавной системе все виды сточных вод собираются в одну общую трубу и отводятся на очистные сооружения.

В раздельной системе бытовые и технические сточные воды отводятся по отдельным трубопроводам на очистные сооружения, а дождевые или условно чистые воды отводятся по отдельному каналу и без очистки сбрасываются в ближайший водоём.

Комбинированная система — это сочетание общесплавной и раздельной систем. Применяется в случае, если в отдельных районах целесообразны различные типы канализационных сетей.

Вывозная система используется для небольших объектов, не имеющих централизованного водоснабжения и водоотведения.

На рис. 6 представлена наиболее информативная схема раздельной системы водоотведения с установками очистки дождевых сточных вод. Эти установки размещаются на линиях с высокой степенью загрязнения сточных вод. Очистка происходит в несколько этапов: механическая очистка, биологическая очистка, физико-химическая очистка, дезинфекция.

При механической очистке задерживаются грубые нерастворённые фракции и тонкодисперсные примеси.

Биологическая очистка является основным этапом очистки сточных вод, она заключается в очистке растворимых загрязнений специальным биоценозом (могут применяться как анаэробные, так и аэробные микроорганизмы). Стоит отметить, что процесс очистки биоценозом зависит от биологических и химических показателей стоков, поступающих на очистные сооружения. Требования к составу сточных вод, описаны в федеральном законе “Общий технический регламент. О водоотведении”.

Физико-химический процесс очистки используют для доочистки растворённых примесей, а в некоторых случаях и от взвешенных веществ. Основными методами физико-химической очистки являются: аэрация, флотация, сорбция, центрифугирование, ионообменная или электрохимическая очистка, гиперфильтрация, нейтрализация, экстракция, эвапорация, выпаривание и кристаллизация.

Дезинфекция применяется для окончательного обеззараживания сточных вод, предназначенных для сброса на рельеф или в водоём. Для дезинфекции используются устройства ультрафиолетового обеззараживания и хлорирование.

Для доступа к сетям водоотведения устанавливают колодцы и камеры, по конструкции схожие с описанными для сетей водоснабжения. С целью доступа к самотёчным

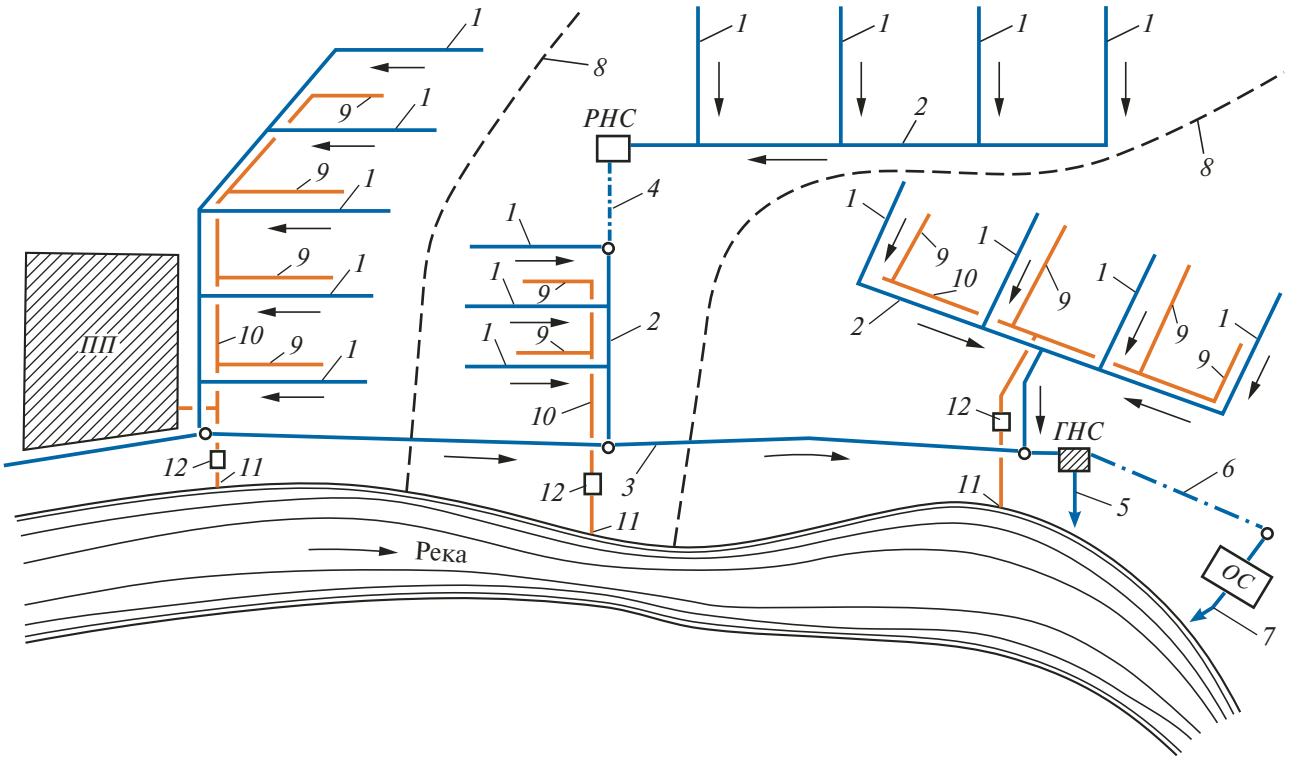


Рис. 6. Схема раздельной системы водоотведения:

1 — уличные коллекторы бытовой сети; *2* — районные коллекторы бытовой сети; *3* — главный городской коллектор бытовой сети; *4* — районный напорный коллектор бытовых сточных вод; *5* — аварийный выпуск бытовых сточных вод; *6* — главный напорный коллектор от насосный станции к очистным сооружениям; *7* — устройство для выпуска очищенных сточных вод; *8* — водоразделы; *9* — уличные коллекторы дождевых сточных вод; *10* — районные коллекторы дождевых сточных вод; *11* — выпуск дождевых сточных вод; *12* — установки очистки дождевых сточных вод; *РНС* — районная насосная станция; *ГНС* — главная насосная станция; *ОС* — очистные сооружения

сетям водоотведения строят переливные колодцы (рис. 7).

Чтобы получать достоверную информацию о количестве и составе сточных вод, поступающих на очистные сооружения, и контролировать сбросы сильнозагрязнённых стоков в канализационную сеть система мониторинга должна контролировать следующие параметры: уровень сточных вод для самотёчной канализации, расход и качество сточных вод (нефть, фенол, ХПК), поступающих на очистные сооружения.

Рис. 7. Общий вид переливного колодца

На рис. 8 представлена функциональная схема системы диспетчерского контроля и управления объектами городской системы водоотведения, которая выполняет следующие функции:

дистанционный контроль параметров объекта: уровень сточных вод, расход, качество сточных вод;

дистанционный контроль и управление щитовым затвором.

Целями системы являются:

дистанционная передача данных о состоянии исполнительных механизмов и показаний КИП в центральный диспетчерский пункт (ЦДП) для мониторинга параметров объекта;

формирование отчётов в виде графиков и таблиц за определённый период времени (минуту, час, сутки, месяц, год);

надёжное автономное электропитание системы диспетчеризации, контрольно-измерительных приборов и исполнительных механизмов.

Для объектов канализационных сетей в качестве автономных источников электроэнергии могут применяться энергия безнапорного потока сточных вод и тепловая энергия сточных вод.

Формирование целей и задач автономной системы диспетчеризации водных природоохранных объектов

Мониторинг природных водных объектов (озёр, рек) направлен на оценку влияния на эти объекты сточных сбросов промышленных предприятий. Такой экологический мониторинг направлен на контроль показателей качества воды [11]: pH, электропроводность, мутность, концентрация взвешенных веществ, содержание нефтепродуктов, содержание аммония в воде, температура воды и т. д.

Оборудование системы диспетчеризации предлагается устанавливать вблизи стоков предприятий в специализированных контейнерах (рис. 9, *а*), либо непосредственно на контролируемом водном объекте — оборудование предлагается устанавливать в буй (рис. 9, *б*)

На рис. 10 представлена функциональная схема системы диспетчерского контроля водных объектов, которая выполняет следующие функции:

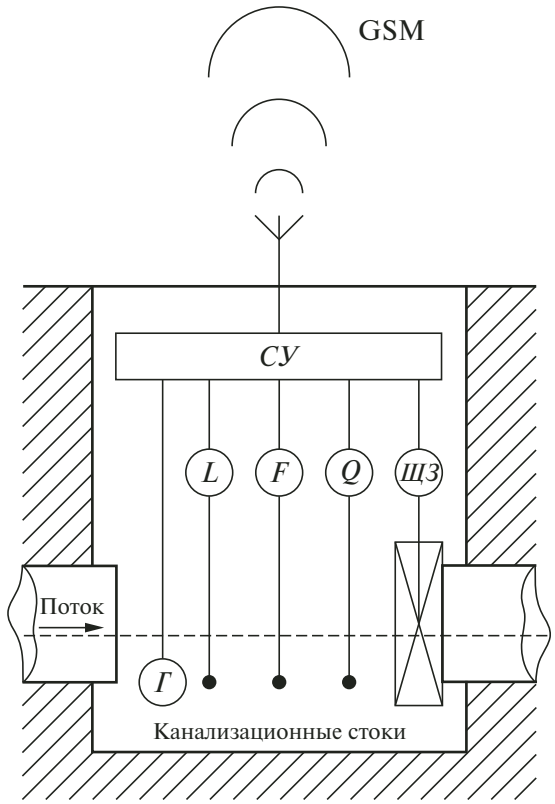


Рис. 8. Функциональная схема системы диспетчерского контроля и управления объектов городской системы водоотведения:
СУ — система управления, *L* — датчик уровня, *F* — датчик расхода/потока, *Q* — датчик контроля качества воды, *ЩЗ* — щитовой затвор, *Г* — гидрогенератор

дистанционный контроль показателей качества воды:

pH (водородный показатель);
электропроводность;
мутность, взвешенные вещества;
нефтепродукты;

а) *б*)

Рис. 9. Общий вид контейнера (*а*) и буя (*б*), в которые предлагается установка оборудования системы диспетчеризации природоохранных водных объектов

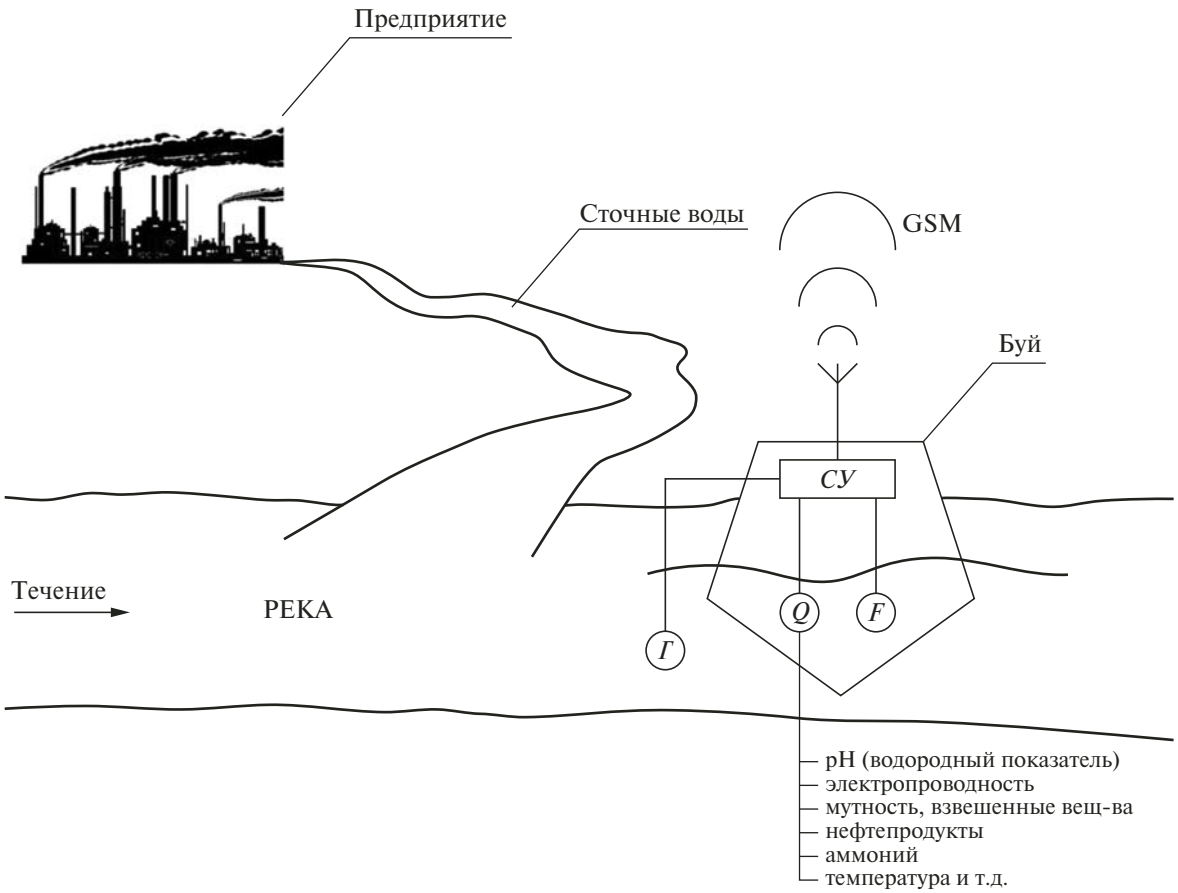


Рис. 10. Функциональная схема системы диспетчерского контроля и управления природоохранных водных объектов: *СУ* — система управления; *F* — датчик расхода/потока; *Q* — датчик контроля качества воды; *Г* — гидрогенератор

аммоний;

температура и т. д.

Целями системы являются:

дистанционная передача данных от промышленных анализаторов в ЦДП для мониторинга качества речной воды и промышленных стоков;

оперативное отображение и регистрация на АРМ диспетчера превышения контролируемых параметров над нормативными показателями;

формирование отчётов в виде графиков и таблиц (за минуту, час, сутки, месяц, год);

надёжное автономное электропитание КИП и оборудования системы.

Для водных природоохранных объектов в качестве автономного источника электроэнергии может служить: энергия течения воды [12].

Принципиальная схема системы диспетчеризации

На рис. 11 представлена общая принципиальная схема, описывающая основные принципы работы автономной системы диспетчеризации природоохранных водных объектов и объектов систем водоснабжения и водоотведения. В качестве источника автономного электропитания (ИАЭ) могут выступать гидрогенератор, пьезоэлектрические и термоэлектрические преобразователи, конвертирующие энергию потока воды, механических вибраций или тепловую энергию в электрическую.

Вырабатываемая ИАЭ электрическая энергия имеет переменную амплитуду и частоту, зависящую от параметров источника: скорости и давления потока воды, амплитуды и частоты механических вибраций, разности температур между горячей и холодной точками термопреобразователя. Чтобы привести параметры электроэнергии к номинальным значениям по питанию электрооборудования, в вводно-распределительном шкафу (ВРШ) устанавливается преобразователь электрической энергии с возможностью подключения аккумуляторных батарей.

Применение аккумуляторных батарей обусловливается переменным характером источника энергии, например значение потока воды в системе водоснабжения переменно во времени

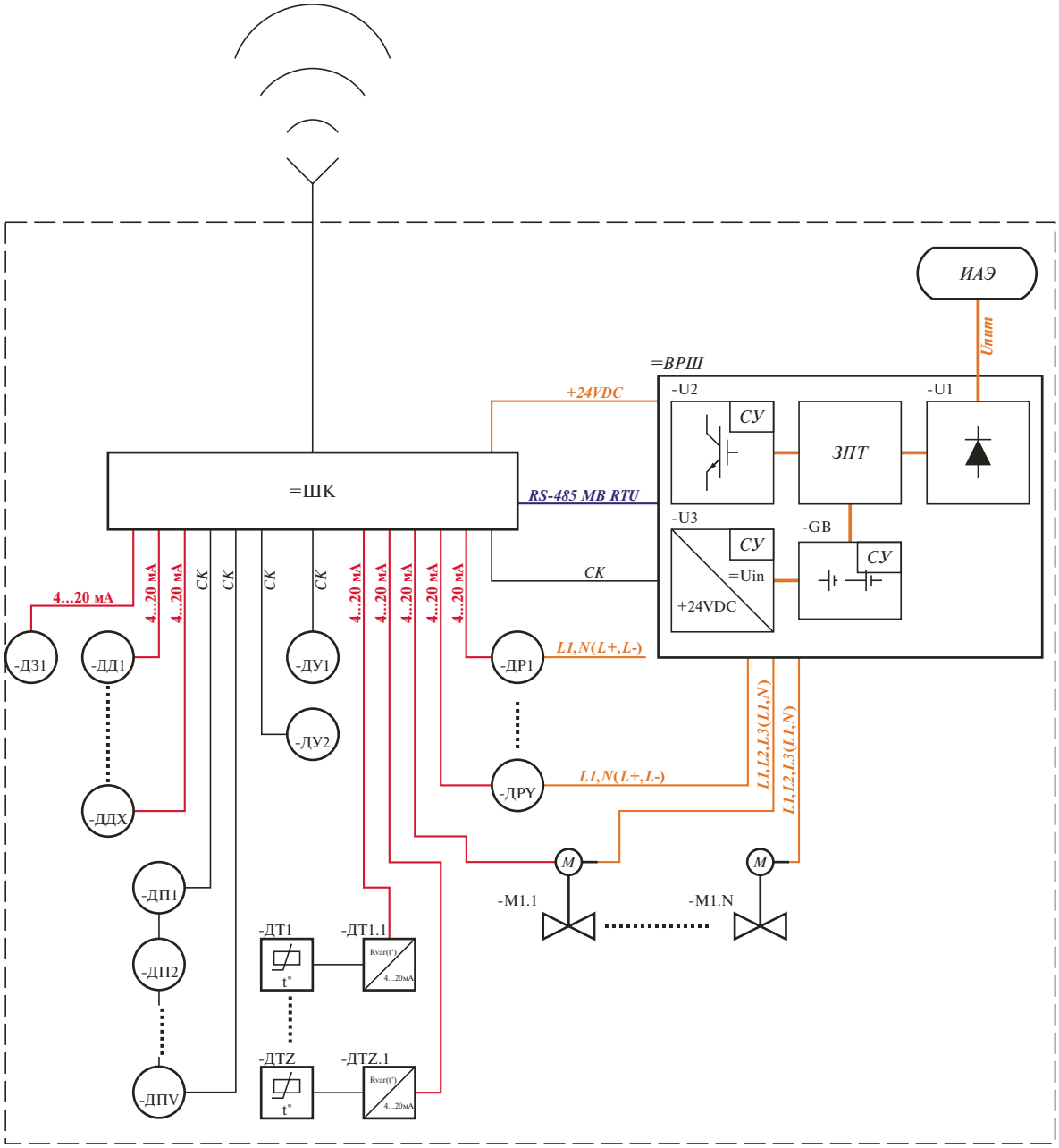


Рис. 11. Принципиальная схема системы диспетчерского контроля и управления:

ШК — шкаф контроллера; *ВРШ* — вводно-распределительный шкаф; *ДЗ* — датчик загазованности; *ДД* — датчик давления; *ДУ* — датчик уровня; *ДП* — датчик проникновения; *ДТ* — датчик температуры; *ДР* — датчик расхода; *М* — исполнительный механизм; *U1* — диодный выпрямитель; *U2* — транзисторный инвертор; *U3* — преобразователь постоянного напряжения; *GB* — аккумуляторные батареи; *ЗПТ* — звено постоянного тока; *СУ* — система управления; *СК* — сигнал типа “сухой контакт”; 4 ÷ 20 мА — токовый сигнал в диапазоне 4 ÷ 20 мА; RS-485 MB RTU — протокол связи ModBus RTU по шине RS-485

и напрямую зависит от количества потребителей воды. Аккумуляторы позволят использовать накопленную электрическую энергию в случаях, когда источник не генерирует энергию или её недостаточно для питания оборудования. Преобразователь позволяет получать переменное напряжение 220/380 В частотой 50 Гц для питания исполнительных механизмов и постоянное напряжение 24 В для питания контрольно-измерительного и телекоммуникационного оборудования. Принципиальная схема преобразователя описана ниже.

Контрольно-измерительные приборы представляют собой маломощное оборудование, служащее для измерения различных параметров объекта. Так, датчики задымленности *ДЗ* служат для контроля наличия в камере угарного газа, являющегося показателем наличия возникновения воспламенения. Датчики давления *ДД*, расхода *ДР*, уровня *ДУ*, температуры

ДТ служат для измерения соответствующих параметров. Так как все вышеописанные объекты являются “режимными”, т. е. находиться на них может только персонал с допуском, то на таких объектах применяются датчики проникновения *ДП*, служащие для определения несанкционированного проникновения на объект.

Исполнительными механизмами являются запорно-регулирующая арматура (ЗРА), регулирующие клапана, щитовые затворы и т. д. Данное оборудование потребляет значительное количество электроэнергии (в зависимости от диаметров трубопроводов). В системе автономной диспетчеризации применение данного оборудования должно носить непостоянный, кратковременный режим работы. Например, применение целесообразно при аварийных ситуациях.

В телекоммуникационном шкафу (ТШ) располагается контроллерное и телекоммуникационное оборудование. В зависимости от количества применяемых на объекте приборов КИП и ИМ, а также характера линий связи данных устройств (сухой контакт — 24 В, токовый сигнал — 0/4...20 мА, сигнал по напряжению — 0...5/10 В, сигналы, передаваемые по линиям связи) определяются количество и тип применяемого контроллерного оборудования: контроллер, модули ввода/вывода аналоговых, дискретных сигналов, модули связи и т. п. Телекоммуникационное оборудование представляет собой модем и антенну для беспроводной передачи/приёма данных из центрального диспетчерского пункта (ЦДП).

Принципиальная схема преобразователя электрической энергии

На рис. 12 представлена принципиальная схема преобразователя электрической энергии, применяемого в системах диспетчеризации. Выводы источника автономного электропитания подключаются к диодному неуправляемому выпрямителю, который собирается по трёхфазной схеме Ларионова. Эта схема позволяет подавать на вход выпрямителя как однофазное, так и трёхфазное напряжение, что существенно расширяет диапазон использования различных типов автономных источников. Так как напряжение на выходе выпрямителя имеет переменное значение, зависящее от параметров источника, и не соответствует напряжению заряда аккумуляторных батарей, в схеме предусмотрен понижающий преобразователь постоянного напряжения (DC/DC-преобразователь).

Для контроля заряда и разряда аккумуляторных батарей используется схема управления аккумуляторами. В ней также предусматривается защита аккумуляторных батарей по току. Если блок аккумуляторных батарей состоит из последовательно соединённых аккумуляторов, то в схеме управления также предусматривается защита от “глубокого” разряда

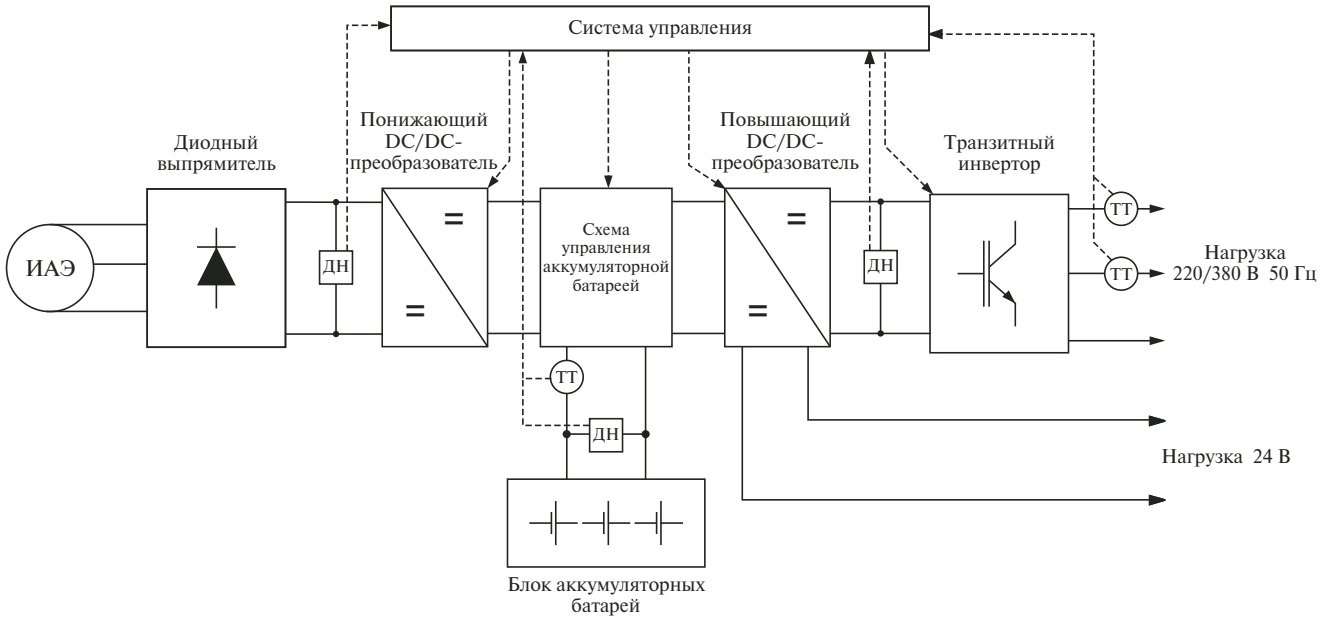


Рис. 12. Принципиальная схема преобразователя электрической энергии:
ДН — датчик напряжения, *ТТ* — трансформатор тока

аккумулятора, осуществляющая балансировку (выравнивание уровня заряда) по напряжению всех ячеек блока аккумуляторов. Схема балансировки необходима, так как при последовательном соединении аккумуляторов происходят неравномерный разряд и соответственно заряд аккумуляторных ячеек. При этом заряд всей цепочки аккумуляторов определяется самой разряженной ячейкой. Если не выполнять балансировку, то неравномерный разряд/заряд приводит к выходу из строя ячейки аккумулятора и всей цепочки в целом.

Для питания оборудования (220/380 В с частотой 50 Гц) применяется трёхфазный транзисторный инвертор. Его ключи работают в ключевом режиме, управляющие сигналы которых формируются при помощи широтно-импульсной модуляции. Для формирования необходимой амплитуды на выходе инвертора напряжение с аккумуляторных батарей необходимо поднять до 513 В (значение принято исходя из напряжения ЗПТ стандартных преобразователей частоты). Для повышения напряжения в схеме предусматривается повышающий DC/DC-преобразователь.

Выводы

1. Описана необходимость создания систем диспетчеризации объектов ЖКХ и водных природоохранных объектов. Сформированы функции и цели данных систем. Разработаны и приведены принципиальные схемы системы диспетчеризации и электрического преобразователя, описывающие принцип их работы.

2. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку электрической схемы и системы управления преобразователем, выбор элементной базы преобразователя и подбор аккумуляторов.

Список литературы

1. **Системы водоснабжения населённых пунктов и промышленных предприятий** [Электронный ресурс] // URL: https://studfile.net/preview/2862309/page:2/.
2. **СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения.**
3. **Casini, M. Harvesting energy from in-pipe hydro systems at urban and building scale** / Casini M. // International Journal of Smart Grid and Clean Energy. 2015/ DOI: 10.12720/sgce.4.4.316-327.
4. **Hoffmann, D. Energy Harvesting from Fluid Flow in Water Pipelines for Smart Metering Applications** / D. Hoffmann, A. Willmann, R. Göpfert, P. Becker, B. Folkmer, Y. Manoli // Journal of Physics Conference Series. 2013/ DOI: 10.1088/1742-6596/476/1/012104.
5. **Андреев, П. Гидроэлектростанция в системе городского водопровода** / П. Андреев // Энергетика и промышленность России. Новые технологии. 2017. — № 20(328). — С. 34.
6. **Зибров, В. А. Пьезогенератор в устройстве структурного мониторинга водопроводных сетей** / В. А. Зибров, С. А. Тряпичкин, О. В. Соколовская [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. — URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1991.
7. **Сапронов, А. А. Пьезоэлектрический генератор в устройстве мониторинга водопровода** / А. А. Сапронов, В. А. Зибров, И. А. Занина, О. В. Соколовская, С. А. Тряпичкин // Энергоснабжение и водоподготовка. — 2012. — № 5(79). — С. 42 – 44.
8. **Шостаковский, П. Современные термоэлектрические источники питания электронных устройств** / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. Блоки питания. — 2015. — № 1. С. 14 – 19.
9. **Виноградов, В. С. Использование термоэлектрических генераторов в судовых энергетических установках как устройств прямого преобразования тепловой энергии в электрическую** / В. С. Виноградов, К. Р. Халыков // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. Астрахань. — 2014. — № 4. — С. 48 – 56.
10. **Muljadi, E. Power generation for River and Tidal Generators** / E. Muljadi, A. Wright, V. Gevorgian, J. Donegan, C. Marnagh, J. McEntee // National Renewable Energy Laboratory. — Technical Report NREL/TP-5D00-66097, June 2016.
11. **ГОСТ Р 57567–2017.** Качество воды. Определение гидроморфологических показателей состояний рек.
12. **Наружные канализационные сети и сооружения. Характеристика сточных вод** [Электронный ресурс] // URL: https://studfile.net/preview/4677346/#2.

References

1. **Sistemy vodosnabzheniya naselennykh punktov i promyshlennykh predpriyatii** (Water supply systems of settlements and industrial enterprises), [Electronic resource]. — URL: https://studfile.net/preview/2862309/page:2/.
2. **SanPiN 2.1.4.1074-01. Pit'evaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody tsentralizovannykh sistem pit'evogo vodosnabzheniya. Kontrol' kachestva. Gigienicheskie trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti sistem goryachego vodosnabzheniya** (SanPiN 2.1.4.1074-01. Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Hygienic requirements for ensuring the safety of hot water systems).
3. **Casini M. Harvesting energy from in-pipe hydro systems at urban and building scale**, International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2015/ DOI: 10.12720/sgce.4.4.316-327.
4. **Hoffmann D., Willmann A., Göpfert R., Becker P., Folkmer B., Manoli Y. Energy Harvesting from Fluid**

Flow in Water Pipelines for Smart Metering Applications, Journal of Physics Conference Series, 2013/ DOI: 10.1088/1742-6596/ 476/1/012104.
5. **Andreev P. Energetika i promyshlennost' Rossii. Novye tekhnologii** (Power and Industry of Russia. New technologies), 2017, No. 20 (328), pp. 34.
6. **Zibrov V. A., Tryapichkin S. A., Sokolovskaya O. V. P'ezogenerator v ustroistve strukturnogo monitoringa vodoprovodnykh setei** (Piezogenerator in the device for structural monitoring of water supply networks), Engineering Bulletin of the Don, 2013, No. 4, [Electronic resource]. — URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1991.
7. **Sapronov A. A., Zibrov V. A., Zanina I. A., Sokolovskaya O. V., Tryapichkin S. A. Energosnabzhenie i vodopodgotovka** (Energysaving and watertreatment), 2012, No. 5(79), pp. 42 – 44.
8. **Shostakovskii P. Komponenty i tekhnologii. Bloki pitaniya** (Components & Technologies. Power supplies), 2015, No. 1, pp. 14 – 19.
9. **Vinogradov V. S., Halykov K. R. Vestnik AGTU. Ser. Morskaya tekhnika i tekhnologiya** (Vestnik ASTU. Series: Marine engineering and technology), Astrakhan, 2014, No. 4, pp. 48 – 56.
10. **Muljadi E., Wright A., Gevorgian V., Donegan J., Marnagh C., McEntee J. Power generation for River and Tidal Generators**, National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-5D00-66097, June 2016.
11. **GOST R 57567–2017. Kachestvo vody. Opredelenie gidromorfologicheskikh pokazatelei sostoyanii rek** (State Standard 57567–2017. Water quality. Identification of the hydromorphological features of rivers).
12. **Naruzhnye kanalizatsionnye seti i sooruzheniya. Kharakteristika stochnykh vod** (External sewer networks and structures. Characterization of wastewater), [Electronic resource]. — URL: https://studfile.net/preview/4677346/#2.

anuchin.alecksey@gmail.com

Promising technical solutions for implementation of an autonomous dispatch system for environmentally protected water bodies and public utilities

Anuchin A. S., Il'in G. G., Dorozhkin A. A.

Active urban development imposes new requirements for the infrastructure of water supply and sanitation. These requirements are aimed at improving the reliability and compliance with environmental standards. The supervisory control and management of water supply and sanitation networks, as well as the quality control of water supply to consumers, and environmental monitoring of the effluent streams into natural water basins are the key goals. Technical solutions are proposed for implementation of the dispatch systems for water supply and sanitation networks, and environmental water bodies.

Keywords: dispatch system; urban water supply system; urban drainage system; voltage converter.

DOI 10.34831/EP.2020.98.61.001

Постановка оптимизационной задачи при проектировании мультиагентной изолированной микроэнергосистемы

Шихин В. А., канд. техн. наук, Абд-Эльрахим А. К., аспирант,
Павлюк Г. П., ст. преподаватель
НИУ "МЭИ", Москва

Рассмотрен подход к математической формулировке задачи многокритериальной оптимизации при проектировании изолированной микроэнергосистемы с разнотипной генерацией с учетом технических, экономических и экологических показателей её функционирования. микроэнергосистема представлена в форме мультиагентной системы, что позволяет оценивать эффективность ее функционирования и отдельных фрагментов (агентов-субъектов). Схема алгоритма оценки эффективности построена на примере проектирования гибридно-генерирующей и экологически безопасной системы тепло- и электроснабжения изолированного объекта.

Ключевые слова: микроэнергосистема, мультиагентная система, многокритериальная оптимизация, эффективность микроэнергосистемы.

Особенности локальных микроэнергосистем

В настоящее время вопрос проектирования высокоэффективных локальных энергосистем, в том числе включающих разнотипные возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и накопители энергии, является актуальным, особенно при рассмотрении совокупности технических, экономических и экологических показателей функционирования. При этом повышение эффективности связано как с функционированием микроэнергосистемы в целом, так и её отдельных субъектов.

Микроэнергосистеме [1] как объекту управления присущи следующие особенности: единое объединение разнородных распределенных и централизованных источников энергии, возобновляемых источников энергии, накопителей энергии и разнотипных потребителей. При этом микроэнергосистема должна обеспечивать надёжное снабжение потребителей при условии полного отделения от централизованного источника, т.е. в изолированном режиме. Важно отметить, что микроэнергосистема представляет собой комбинацию управляемых и неуправляемых источников энергии, что затрудняет достижение баланса мощности, повышает актуальность регулирования напряжения и соотношения активной и реактивной мощности в распределительной сети. Стратегии управления микроэнергосистемой могут существенно отличаются от стратегий управления традиционными энергосистемами и даже от СмартГрид [2]. Основные причины связаны с существенными различиями динамических характеристик мощных энергоустановок от субъектов микроэнергосистем, дисбалансами из-за наличия значительных однофазных нагрузок, неуправляемых или частично-управляемых источников, существенно различающихся частот коммутаций и перекоммутации и др. В рамках микроэнергосистемы принимаемые решения по управлению каким-либо субъектом оказывают, как правило, большое влияние на принимаемые решения по отношению к другим субъектам, а приоритет отдается в пользу децентрализованного управлении.

Примером таких микроэнергосистем, проектирование и создание которых является актуальной задачей не только в России, но и за рубежом, являются изолированные (автономные или частично автономные) системы генерации и энергоснабжения в труднодоступных районах высокогорья, Крайнего Севера и Арктики, островных систем, а также бортовых систем крупных судов [3] и т. д. В рамках указанных микроэнергосистем различные их субъекты активно взаимодействуют в реальном времени.

Мультиагентное представление микроэнергосистемы

Решение оптимизационных задач, связанных с многоцелевым управлением, при наличии противоречивых критериев и неравновесном распределении критериев между разнородными субъектами динамической системы можно связать с мультиагентным представле-

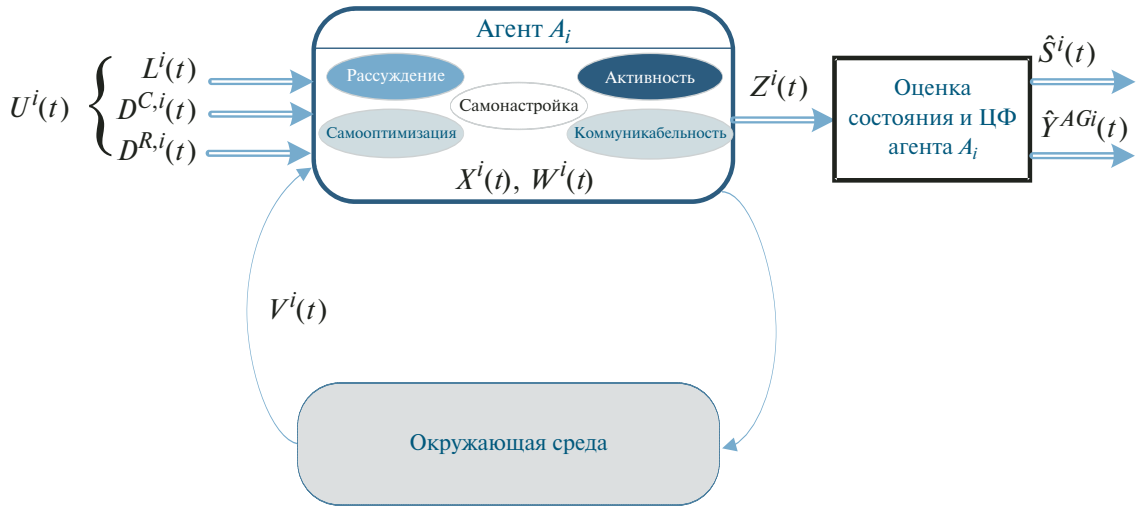


Рис. 1. Формализованное представление агента МАС:

$U^i(t)$ — вектор входных ограничений и уставок, связанный с функциональной чертой “коммуникация”, при этом $U^i(t) = [L^i, D^{C,i}, D^{R,i}]^T$, где L — технологические ограничения агента; $D^{C,i}$ — вектор входных команд; $D^{R,i}$ — вектор входных рекомендаций; $Z(t)$ — вектор выходных переменных, характеризующих протекание физических процессов во времени, по которым идентифицируется состояние агента; $S(t)$ — вектор состояний агента, связанный с его функциональной чертой “активность”, а также показатели качества его функционирования Y^{AG}; $X(t)$ — вектор параметров и событийно-изменяющихся констант агента, связанный с его функциональными чертами “самонастройка” (в отношении параметров) и “рассуждение” (в отношении констант); $W(t)$ — вектор внутренних генерируемых управлений агента, связанный с его функциональной чертой “самооптимизация”

нием исходной системы МАС. Мультиагентная форма представления многокомпонентных динамических систем находит всё большее применение, в том числе для исследования микро-энергосистем [4 – 8], позволяя создавать иерархические системы управления на основе распределения функций управления между автономными и кооперативными агентами для реализации таких важных характеристик, как модульность, гибкость, надёжность, реконфигурируемость и т. п.

На рис. 1 приведено формализованное представление агента, предложенное в данной работе с учётом основных функциональных черт, присущих агенту: рассуждение, самонастройка, самооптимизация, коммуникабельность, активность. В табл. 1 приведен перечень агентов, отражающих основные субъекты микроэнергосистемы, который может быть расширен для более подробного описания или в связи с конкретными специфическими чертами рассматриваемой системы.

Основные агенты некоторой достаточно типовой микроэнергосистемы и их взаимосвязь в процессе функционирования представлены в виде схемы на рис. 2. Здесь термин “Окружающая среда” имеет расширенное толкование, включая взаимодействие микроэнергосистемы с внешними, в том числе со смежными техническими системами.

Формулировка целевых функций эффективности функционирования микроэнергосистемы

Большинство известных [9 – 11] подходов к решению оптимизационных задач применительно к управлению микроэнергосистемой формулируются в рамках однокритериальной постановки, а именно на минимизацию общих эксплуатационных затрат или минимизацию потерь. Имеются формулировки оптимизационных задач в многокритериальной постановке [12]. Однако во всех этих подходах осуществляется сведение многокритериальной задачи к скалярному случаю, включая формальное объединение технических и экономических показателей, что, по мнению большинства специалистов в области создания и эксплуатации микроэнергосистем, недопустимо. Эффективность функционирования микроэнергосистемы рекомендуется оценивать единым интегрированным показателем и, как минимум, следует подразделять на относительно обособленное рассмотрение технической и экономической эффективности с введением соответствующих целевых показателей и критериев.

Предлагается подход к формулированию оптимизационных задач, связанных с повышением эффективности микроэнергосистемы на основе введения раздельного рассмотрения отдельных групповых показателей эф-

Таблица 1

Формализованные агенты и их функциональность в составе МАС

Агент, A_i	Функциональность, F_{ij1}	Агент, A_i	Функциональность, F_{ij}
1. Центр управления и связи (ЦУС) микро-энергосистемы, агент А1	$F_{1,1}$ — ответственность за управление, $F_{1,2}$ — отслеживание и планирование режимов ВИЭ, $F_{1,3}$ — прогнозирование генерируемой мощности источника ВИЭ, $F_{1,4}$ — прогнозирование состояния накопителей энергии, $F_{1,5}$ — стабилизация частоты, $F_{1,6}$ — обеспечение динамической устойчивости	5. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечная электростанция (СЭС), агент A_5	$F_{5,1}$ — ответственность за генерацию соответствующей СЭС
		6. ВИЭ: ветровая электростанция (ВЭС), агент A_6	$F_{6,1}$ — ответственность за генерацию соответствующей ВЭС
		7. Накопители энергии (НЭ), агент A_7	$F_{7,1}$ — участие в покрытии дефицита мощности, $F_{7,2}$ — участие в поглощении избытка мощности, $F_{7,3}$ — участие в регулировании частоты, $F_{7,4}$ — повышение динамической устойчивости
2. Распределительная электросеть (РЭС), включающая подстанцию, агент A_2	$F_{2,1}$ — ответственность за внешнее по отношению к микро-энергосистеме электроснабжение, $F_{2,2}$ — прием излишков электроэнергии во внешнюю сеть	8. Спрос потребителя (ПЭЭ), агент A_8	$F_{8,1}$ — целевое использование электроэнергии
		9. Спрос ценозависимого потребителя (ЦЗП), агент A_9	$F_{9,1}$ — целевое использование электроэнергии, $F_{9,2}$ — участие в регулировании мощности
3. Распределенные дизель-генераторные установки (ДГУ), агент A_3	$F_{3,1}$ — ответственность за генерируемую мощность распределённого генератора или группы генераторов	10. База данных реального времени (БДРВ), агент A_{10}	$F_{10,1}$ — сбор, хранение, обмен данными и архивами
4. Распределенные газопоршневые установки (ГПУ), агент A_4	$F_{4,1}$ — ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределённого генератора или группы генераторов	11. Система имитационного моделирования (SIM), агент A_{11}	$F_{11,1}$ — моделирование, тестирование режимов функционирования

фективности на первом этапе и переход к совокупному учёту показателей эффективности как отдельных агентов, так и системы в целом на втором этапе. Основные критерии эффективности функционирования микро-энергосистемы представлены в табл. 2, на основе которых были сформулированы целевые функции.

Рассмотрим подробнее приведённые в табл. 2 критерии эффективности.

1. ***Качество электроэнергии (КЭ).*** Качество производимой и отпускаемой потребителям электроэнергии является одним из основных критериев при оценке эффективности функционирования любой энергосистемы и регулируется в соответствии с ГОСТ 32144–2013 “Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения”, где указаны более 10 показателей, из которых выберем два в качестве целевых функций (без потери общности математической постановки задачи):

отклонение основной частоты напряжения от номинального $\Delta f = f - f_{nom}$ связано прежде всего с дефицитом активной мощности и не должно превышать $\pm 0{,}2$ Гц в течение 95 % времени;

отклонения напряжения δU (в отличие от значений провалов и перенапряжений) отрицательного $\delta U_{(-)}$ и положительного $\delta U_{(+)}$ могут быть связаны с множеством факторов, учесть которые в компактном математиче-

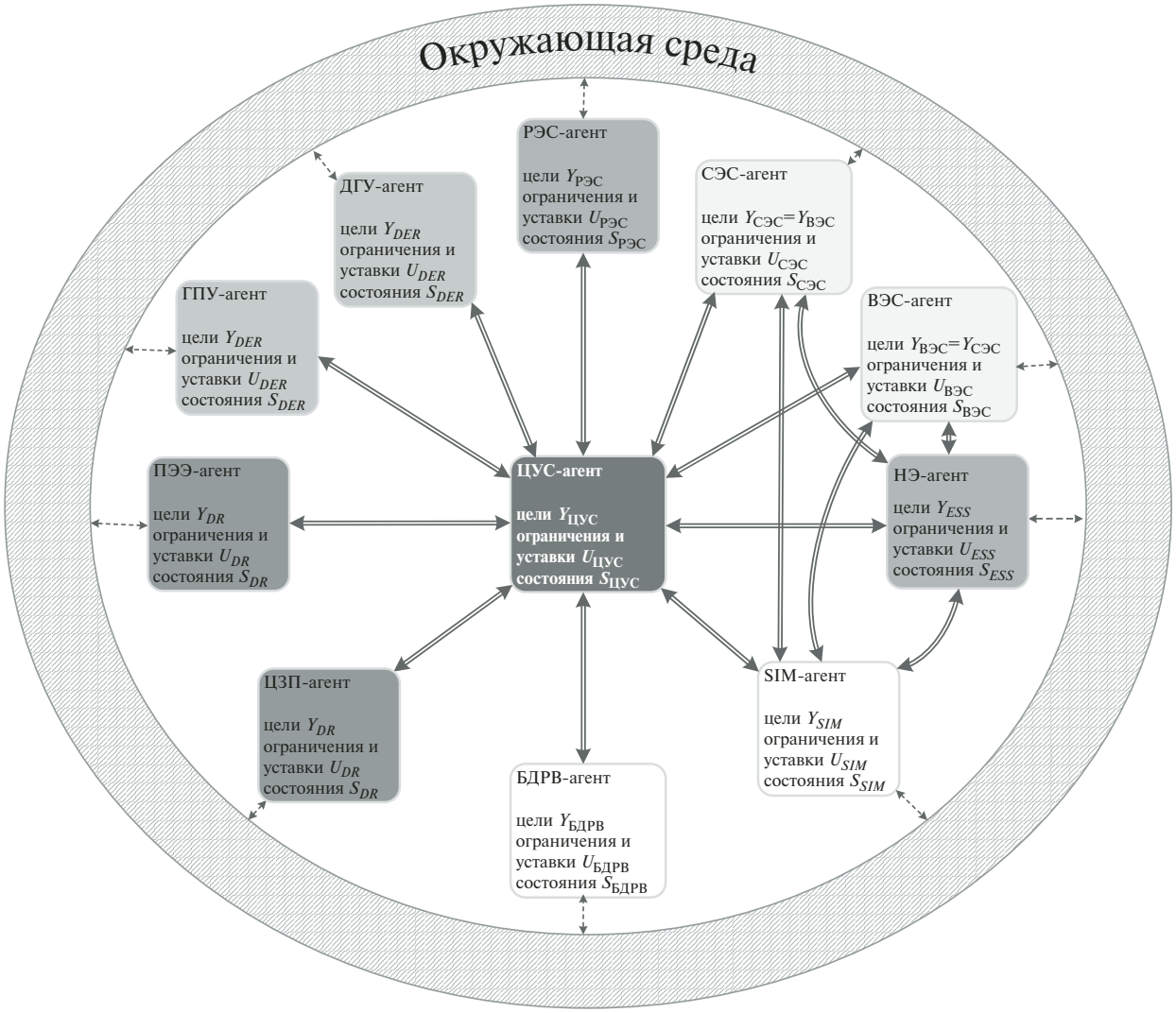


Рис. 2. Общая структура микроэнергосистемы в представлении МАС

ском выражении в общем случае не представляется возможным, но в первую очередь они связаны с соотношением активной и реактивной мощности. Отклонение напряжения в сети определяется на основе сравнения значений напряжения общей шины U^{SYS} и опорного напряжения U_{ref}. Следовательно, $\delta U = U_{ref} - U^{SYS}$.

2. *Экономический критерий (ЭК).* Экономический критерий Y_2^{SYS} формируется из трёх составляющих: стоимости генерируемой электроэнергии $y_3^{SYS} \triangleq C^{EN}$, цены для потребителя $y_4^{SYS} \triangleq PR$, прибыли владельца микроэнергосистемы $y_5^{SYS} \triangleq REV$.

3. *Надёжность процесса электроснабжения* Y_3^{SYS}. Надежность процесса электроснабжения в микроэнергосистеме, как и для больших электрических сетей оценивается с использованием нормативно установленных показателей. Возникновение технологических нарушений в элементах электрической сети и масштабы их последствий зависят от многих случайных факторов. Соответственно, исследование надёжности сетевых комплексов обосновано в рамках вероятностных категорий. Именно поэтому к настоящему времени накоплен отечественный и зарубежный опыт решения задач по оценке надёжности систем электроэнергетики со следующими тремя категориями, соответствующими международной классификации показателей надежности: CAIDI — индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей (время ремонта); SAIDI – индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей (продолжительность отказа); SAIFI — индекс средней частоты перерывов в электроснабжении потребителей (частота отказов) [13].

Таблица 2

Критерии и показатели эффективности функционирования микроэнергосистемы

Критерий эффективности функционирования	Целевая функция	Оптимизационная задача на *min* или *max*	Входные переменные и параметры	Допустимый предел погрешности измерений
1. Качество электроэнергии (КЭ), Y_1^{SYS}	1.1. Отклонение частоты $y_1^{SYS} \triangleq \Delta f$	Поддержание в заданных пределах Δf^+, Δf^-	1.1.1. f_{nom} — номинальная частота, 1.1.2. f — текущее значение основной частоты напряжения, 1.1.3. Δf^+, $\Delta f^- = \pm 0{,}2$ Гц	$\pm 0{,}03$ Гц
	1.2. Отклонение напряжения, $y_2^{SYS} \triangleq \delta U$	Min	1.2.1. U_{nom} — номинальное напряжение, 1.2.2. U — текущее значение напряжения, 1.2.3. $\delta U_{(-)}$, $\delta U_{(+)} = \pm 10$ %	Погрешность измерения длительности не должна превышать $\pm 0{,}01$ с
2. Экономический критерий (ЭК), Y_2^{SYS}	2.1. Стоимость генерируемой электроэнергии $y_3^{SYS} \triangleq C^{EN}$	Min	2.1.1. Стоимость топлива C^F, 2.1.2. Расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание C^{OM}, 2.1.3. плата / штрафы за выброс загрязняющих веществ C^{PO}	10 %
	2.2. Цена для потребителя $y_4^{SYS} \triangleq PR$	Min	2.2.1. Фиксированный многозонный тарифный график	1 %
	2.3. Прибыль владельца микроэнергосистемы $y_5^{SYS} \triangleq REV$	Max	2.3.1. Цена продажи электроэнергии Pr^C, 2.3.2. Объем проданной электроэнергии P^{MG}	5 %
3. Надежность процесса электроснабжения Y_3^{SYS}	3.1. Индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей, $y_6^{SYS} \triangleq$ CAIDI	Min	3.1.1. Суммарное время отключения потребителей, T_Σ, 3.1.2. Общее число отключений, OUT_Σ	1 %
	3.2. Индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении, $y_7^{SYS} \triangleq$ SAIDI	Min	3.2.1. Суммарное время отключения потребителей, T_Σ, 3.2.2. Общее количество потребителей, N_Σ	1 %
	3.3. Индекс средней частоты перерывов в электроснабжении, $y_8^{SYS} \triangleq$ SAIFI	Min	3.3.1. Общее число отключений, OUT_Σ, 3.3.2. Общее количество потребителей, N_Σ	1 %
4. Экологичность Y_4^{SYS}	4.1. Количество выбросов парниковых газов (углекислый газ) $y_9^{SYS} \triangleq CO_2$	Min	4.1.1. Фактическое потребление топлива, M^{fuel}, 4.1.2. Количество выбросов углекислого газа от источников энергии, PO^{CO_2}	10 %
	4.2. Количество выбросов парниковых газов (оксиды азота) $y_{10}^{SYS} \triangleq NO_x$	Min	4.2.1. Фактическое потребление топлива M^{fuel}, 4.2.2. Количество выбросов оксидов азота от источников энергии, PO^{NO_x}	10 %

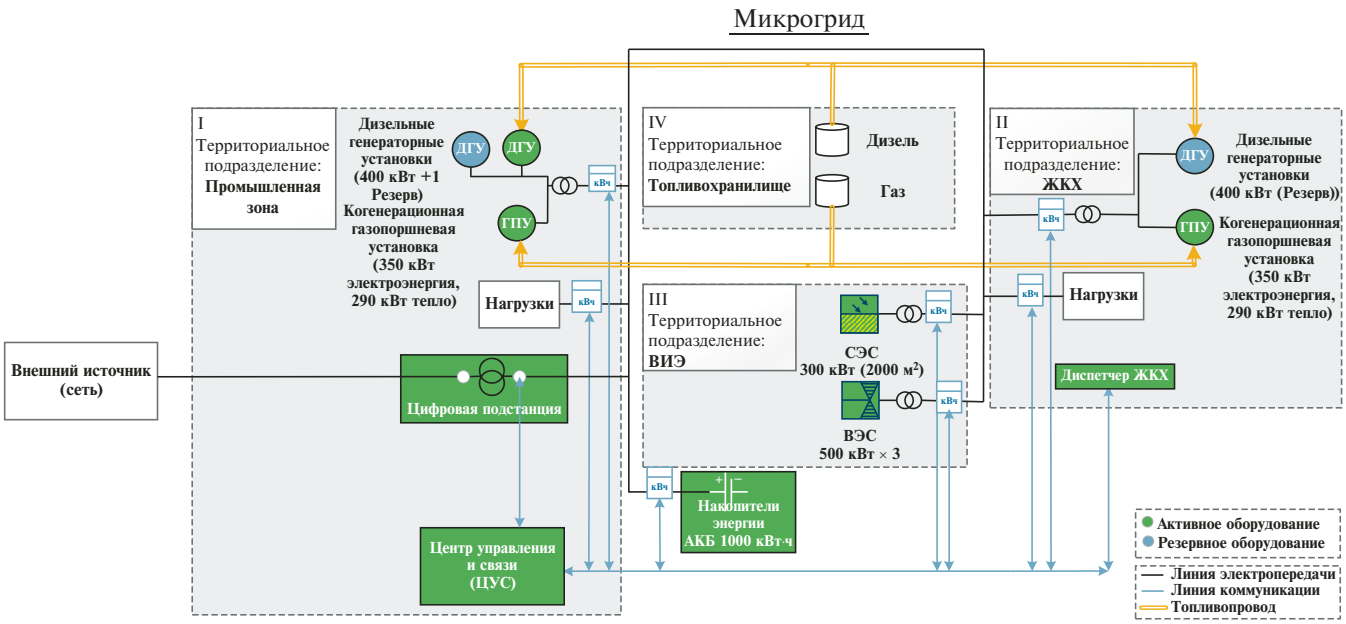


Рис. 3. Общая функциональная схема микроэнергосистемы для арктического анклава:
(I) — промышленная зона; (II) — жилищно-коммунальный комплекс; (III) — солнечная и ветровая электростанции; (IV) — топливохранилище

4. ***Экологичность*** Y_4^{SYS}**.** Предлагается ограничиться рассмотрением выброса парниковых газов (CO_2, NO_x и др.), хотя список можно расширить.

Пример

На рис. 3 показана общая функциональная схема микроэнергосистемы, подготовленная в рамках НИОКР межведомственной комплексной целевой программы “Арктические технологии” по теме “Автоматизированный комплекс управления высоконадежной гибридно-генерирующей и экологически безопасной тепло-электро-снабжающей микроэнергосистемой с высокими техноэкономическими показателями”. Разработанное техническое решение может рассматриваться как базовое при использовании в задачах обеспечения надёжного снабжения энергоресурсами объектов арктических регионов, включающих объекты как промышленного строительства, так и жилой инфраструктуры. Предлагаемое решение с зависимой и независимой от поставок топлива генерацией тепла и электроэнергии применимо к любым труднодоступным зонам и может быть реализовано также при полном отсутствии магистральных линий электропередачи.

Арктический объект — это достаточно компактный анклав из следующих четырех относительно обособленных территориальных образований: (I) — промышленной зоны; (II) — жилищно-коммунального комплекса; (III) — солнечной и ветровой электростанции; (IV) — топливохранилища. Решение задачи оценки эффективности функционирования проектируемой пилотной микроэнергосистемы (рис. 4) предлагается разбить на несколько этапов.

Этап 1. Соответствует решению задача выбора таких моделей описания агентов, которые адекватно соответствуют исследуемым целевым функциям и отвечают ограничениям по точности (см. табл. 2) и информативности:

$$\mathrm{MO}^{A_i} \underset{\Theta_i}{\overset{\varepsilon_i}{\leftrightarrow}} y_j^{SYS}. \qquad (7)$$

Этап 2. На данном этапе выполняется синтез имитационной мультиагентной модели исследуемой системы с учетом специфики каждой ЦФ y_j^{SYS}, где $j = 1 \div 10$ (из четырех групп критериев, указанных в табл. 2). Расчет показателей эффективности осуществляется совместно с расчётом точности оценивания e_j, что является важной выходной информацией. Хотя в синтезированной мультиагентной модели описания системы в целом (см. рис. 2) отдельные агенты функционируют в условиях взаимодействия соответствующих общесистемных процессов, важно оценить их собственные ЦФ y_j^{AG} и решать задачи по самооптимизации и самонастройке, что и от-

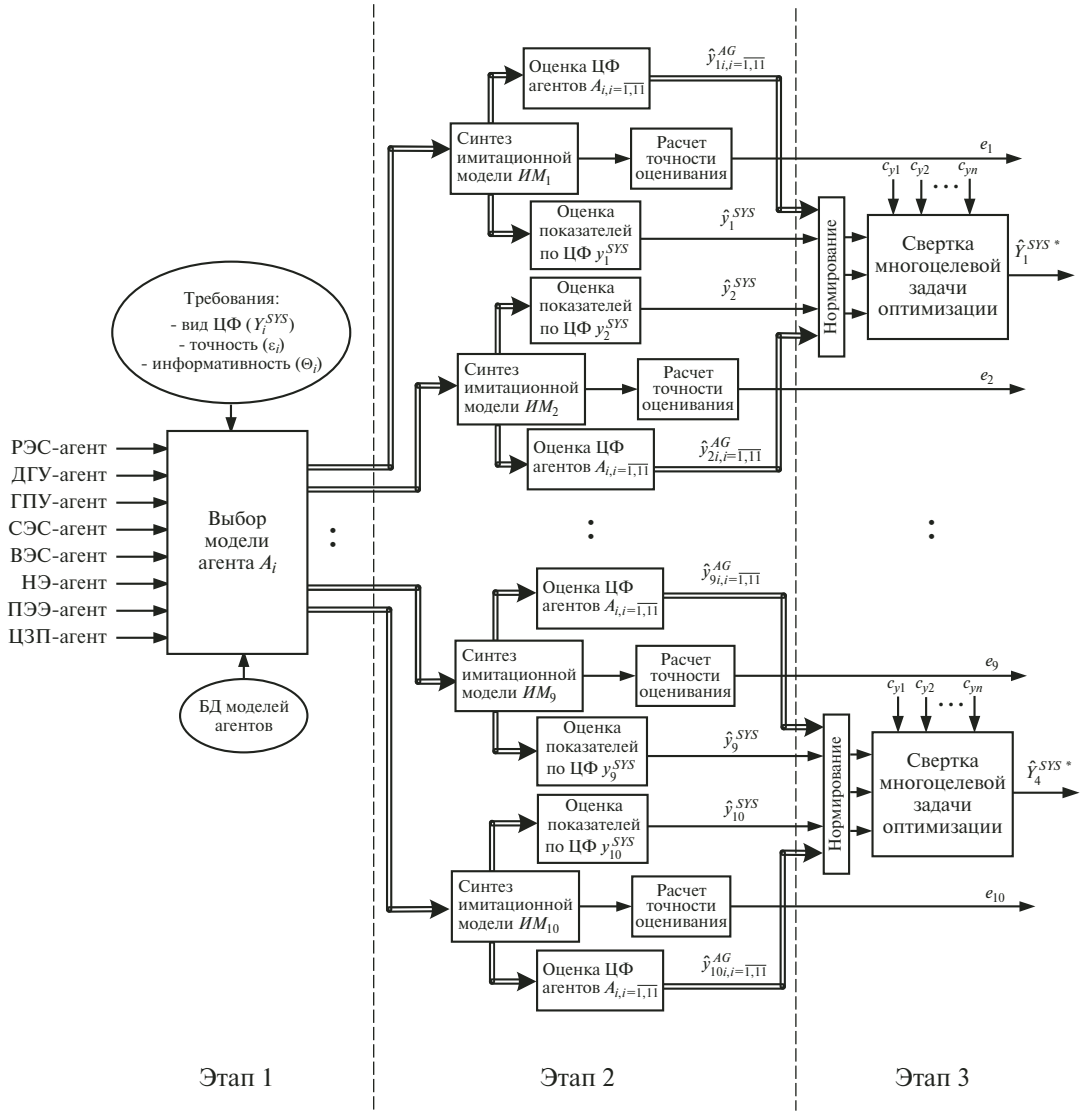


Рис. 4. Решение задачи оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы:

РЭС-агент — распределительная электрическая сеть; ДГУ-агент — дизель-генераторная установка; ГПУ-агент — газопоршневая установка; СЭС-агент — солнечная электростанция; ВЭС-агент — ветровая электростанции; НЭ-агент — накопители энергии; ПЭЭ-агент — спрос потребителя; ЦЗП-агент — спрос ценозависимого потребителя; ε_i — точность модели агента A_i; Θ_i — информативность модели агента A_i; e_k — погрешность расчета показателя эффективности целевой функции Y_k^{SYS}; c_{yk} — весовой коэффициент показателя эффективности целевой функции Y_k^{SYS}

ражено в схеме решения оптимизационной задачи, представленной на рис. 4.

Этап 3. По полученным оценкам показателей осуществляется расчёт оценки соответствующих критериев эффективности для системы в целом (см. табл. 2) Y_k^{SYS}, где $k = 1 \div 4$, а также значений индивидуальных показателей эффективности функционирования отдельных агентов y_j^{AG} Этап соответствует решению задачи получения численной оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы, сочетающей все четыре предложенные выше общесистемные критерия.

Выводы

1. Предложенная математическая модель описания унифицированного динамического агента позволяет представить микроэнергосистему, состоящую из разнородных компонентов (непрерывных, дискретных и дискретно-событийных) в мультиагентной форме.

2. Решение задачи оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы по разнотипным показателям сведено к формализованному процесс интеграции разнородных целевых функций в единые групповые критерии. Предложенная общая схема решения оптимизационной задачи позволяет совместно оценивать эффективность функ-

ционирования как отдельных агентов, так и взаимосвязанной из агентов системы в целом.

3. На примере оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы для Арктического анклава представлена схема вычислительной процедуры предложенного метода и продемонстрирована практическая ценность выполненных разработок при решении задач проектирования систем с заданными техническими, экономическими и экологическими характеристиками.

Список литературы

1. **Marnay, C. Microgrid Evolution Roadmap** / C. Marnay, S. Chatzivasileiadis, C. Abbey, R. Iravani, G. Joos, P. Lombardi, P. Mancarella, J. Appen // International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST). — 2015. — P. 139 – 144.
2. **Katiraei, F. Microgrids management** / F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, A. Dimeas // IEEE Power Energy Mag. — Vol. 6. — No. 3. — P. 54 – 65.
3. **Guerrero, J. M. Shipboard Microgrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies** / J. M. Guerrero, Z. Jin, W. Liu, M. B. Othman, M. Savaghebi, A. Anvari-Moghaddam, L. Meng, J. C. Vasquez // Proceedings of the International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Asia 2016), Shanghai, China. — P. 1 – 8.
4. **Minchala-Avila, Luis I. Review of Optimal Control Techniques Applied to the Energy Management and Control of Microgrids** / Luis I. Minchala-Avila, Luis E. Garza-Castanon, Adriana Vargas-Martınez, and Youmin Zhangc // Procedia Computer Science 52 (2015). — P. 780 – 787.
5. **Leitao, P. Past present and future of industrial agent applications** / P. Leitao, V. Marik, P. Vrba // IEEE Trans. Ind. Inf. — 2013. — Vol. 9. — No. 4. — P. 2360 – 2372.
6. **Metzger, M. A survey on applications of agent technology in industrial process control** / M. Metzger, G. Polaków // IEEE Trans. Ind. Inf. — 2011. — Vol. 7. — No. 4. — P. 570 – 570.
7. **McArthur, S. Multi-agent systems for power engineering applications. Concepts, approaches and technical challenges** / S. McArthur, E. Davidson, V. Catterson, A. Dimeas, N. Hatziargyriou, F. Ponci, T. Funabashi // IEEE Transactions on Power Systems. — 2007. — Vol. 22. — No. 4. — P. 1743 – 1752.
8. **Kantamneni, A. Survey of multi-agent systems for microgrid control** / Kantamneni A., Brown L., Parker G., Weaver W. // Engineering applications of artificial intelligence. — 2015. — No. 45. — P. 192 – 203.
9. **Dulau, L. I. Optimization of Generation Cost in a Microgrid** / L. I. Dulau, D. Bica // Procedia Manufacturing. — 2018. — No. 22. — P. 703 – 708.
10. **Nafisi, H. Two-stage optimization method for energy loss minimization in microgrid based on smart power management scheme of phevs** / H. Nafisi, M. M. Agha, H. A. Abyaneh, M. Abedi // IEEE Trans. Smart Grid. — 2016. — Vol. 7. — No. 3. — P. 1268 – 1276.
11. **Wang, Y. Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response** / Y. Wang, Y. Huang, Y. Wang, F. Li, Y. Zhang, C. Tian // Sustainability. — 2018. — No. 10. — P. 847 – 872.
12. **Dehghanpour, K. Real-Time Multiobjective Microgrid Power Management Using Distributed Optimization in an Agent-Based Bargaining Framework** / K. Dehghanpour, H. Nehrir // IEEE Trans. Smart Grid. — 2017. — Vol. 9. — No. 6. — P. 6318 – 6327.
13. **Shikhin, V. A. Multi-agent approach for real-time optimal control of electro microgrid** / V. A. Shikhin, A. K. Abd Elraheem, J. Ren. — 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russian Federation. 3 – 4 Oct. 2018. — P. 1 – 6. DOI: https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602637

References

1. **Marnay C., Chatzivasileiadis S., Abbey C., Iravani R., Joos G., Lombardi P., Mancarella P., Appen J. Microgrid Evolution Roadmap.** International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015, pp. 139 – 144.
2. **Katiraei F., Iravani R., Hatziargyriou N., Dimeas A. Microgrids management.** IEEE Power Energy Mag., Vol. 6, No. 3, pp. 54 – 65.
3. **Guerrero J. M., Jin Z., Liu W., Othman M. B., Savaghebi M., Anvari-Moghaddam A., Meng L., Vasquez J. C. Shipboard Microgrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies.** Proceedings of the International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Asia 2016), Shanghai, China, pp. 1 – 8.
4. **Minchala-Avila Luis I., Garza-Castanon Luis E., Vargas-Martınez Adriana, Zhangc Youmin. Review of Optimal Control Techniques Applied to the Energy Management and Control of Microgrids**, Procedia Computer Science, 52, 2015, pp. 780 – 787.
5. **Leitao P., Marik V., Vrba P. Past present and future of industrial agent applications.** IEEE Trans. Ind. Inf., 2013, Vol. 9, No. 4, pp. 2360 – 2372.
6. **Metzger M., Polaków G. A survey on applications of agent technology in industrial process control.** IEEE Trans. Ind. Inf., 2011, Vol. 7, No. 4, pp. 570 – 570.
7. **McArthur S., Davidson E., Catterson V., Dimeas A., Hatziargyriou N., Ponci F., Funabashi T. Multi-agent systems for power engineering applications. Concepts, approaches and technical challenges.** IEEE Transactions on Power Systems, 2007, Vol. 22, No. 4, pp. 1743 – 1752.
8. **Kantamneni A., Brown L., Parker G., Weaver W. Survey of multi-agent systems for microgrid control.** Engineering applications of artificial intelligence, 2015, No. 45, pp. 192 – 203.
9. **Dulau L. I., Bica D. Optimization of Generation Cost in a Microgrid.** Procedia Manufacturing, 2018, No. 22, pp. 703 – 708.
10. **Nafisi H., Agha M. M., Abyaneh H. A., Abedi M. Two-stage optimization method for energy loss minimization in microgrid based on smart power management scheme of phevs.** IEEE Trans. Smart Grid, 2016, Vol. 7, No. 3, pp. 1268 – 1276.

11. **Wang Y., Huang Y., Wang Y., Li F., Zhang Y., Tian C. Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response.** Sustainability, 2018, No. 10, pp. 847 – 872.
12. **Dehghanpour K., Nehrir H. Real-Time Multiobjective Microgrid Power Management Using Distributed Optimization in an Agent-Based Bargaining Framework.** IEEE Trans. Smart Grid, 2017, Vol. 9, No. 6, pp. 6318 – 6327.
13. **Shikhin V. A., Abd Elraheem A. K., Ren J. Multi-agent approach for real-time optimal control of electro microgrid.** 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russian Federation, 3 – 4 Oct., 2018, pp. 1 – 6, [Electronic resource]. — URL: https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602637.

ShikhinVA@mpei.ru

Statement of optimization problem in designing a multi-agent stand-alone micro-energy system

Shikhin V. A., Abd Elraheem A. K., Pavlyuk G. P.

An approach to the mathematical formulation of the multicriteria optimization problem in designing an isolated micro-energy system with heterogeneous generation is considered taking into account technical, economic and environmental indicators of the system functioning. The micro-energy system is presented in the form of a multi-agent system, which provides evaluation of the efficiency of functioning of the system as a whole and separate fragments (agents-constituents). The scheme of the algorithm for assessing the efficiency is based on the example of designing a hybrid-generating and environmentally friendly system of heat and power supply of an isolated object.

Keywords: micro-energy system, multi-agent system, multi-criteria optimization, efficiency of the micro-energy system.

DOI 10.34831/EP.2020.88.98.002

Модели процессов передачи цифровых сигналов по различным протоколам МЭК 61850

Власова Е. П., Хмара Г. А., кандидаты техн. наук, Махмутова В. Р., магистрант
Тюменский индустриальный университет

Приведена разработанная имитационная модель высоковольтного выключателя, позволяющая сократить нагрузку на информационную сеть, обеспечивая повышение скорости передачи сигналов между устройствами релейной защиты и автоматики (РЗиА) и первичным оборудованием подстанции, а также сократить число проводных линий связи путем перехода на протокол МЭК 61850, который позволит уменьшить затраты при строительстве и модернизации объектов. На основе разработанной модели можно реализовывать задачи диспетчерского управления и передачи цифровых сигналов между устройствами релейной защиты и автоматики для инженеров и проектировщиков нефтегазового комплекса. Полученная топология сети цифровой подстанции повышает быстродействие и уменьшает время срабатывания исполнительной части за счет уменьшения времени аварийного режима (времени отключения короткого замыкания).

Ключевые слова: цифровая подстанция (ЦПС), протокол МЭК 61850, имитационная модель высоковольтного выключателя, интеллектуальная электроэнергетика, топология сети программно-аппаратного комплекса цифровой подстанции, типы трафиков для протоколов ЦПС, шина процесса, шина станции.

В настоящее время одним из направлений развития отечественной и мировой электроэнергетики является применение на энергообъектах цифровых устройств релейной защиты, противоаварийной автоматики, контроллеров автоматизированной системы управления технологическим процессом, систем коммерческого учета и контроля качества электроэнергии. Развитие цифровых технологий позволило перейти с аналоговых и дискретных сигналов на цифровые. Данные технологии привели к развитию направления “цифровая подстанция” (ЦПС), которая разработана на основе стандарта МЭК-61850 [1].

Отличительные характеристики ЦПС: наличие интеллектуального (микропроцессорного) оборудования, применение локальных вычислительных сетей для коммуникаций, цифровой способ доступа к информации, её передаче и обработке, автоматизация работы подстанции и процессов управления. В перспективе цифровая подстанция должна стать ключевым компонентом интеллектуальной сети (Smart Grid) [2].

В состав ЦПС входят: силовое первичное оборудование; цифровые измерительные трансформаторы; программно-аппаратный комплекс цифровой подстанции (ПАК ЦПС) [3]. ПАК ЦПС состоит из вторичных цепей трансформаторов тока и напряжения (ТТ и ТН), цепей дискретных сигналов, устройств сопряжения с объектом (УСО), коммуникационного оборудования (коммутаторы, маршрутизаторы), систем синхронизации времени, централизованных интеллектуальных электронных устройств (ЦИЭУ), серверов ПАК ЦПС, автоматизированного рабочего места (АРМ).

В качестве измерительных трансформаторов ЦПС применяются цифровые трансформаторы тока и напряжения (ЦТТ и ЦТН). Передача потоков сигналов от ЦТТ и ЦТН осуществляется по волоконно-оптическому кабелю [4, 5]. Тип интерфейса, применяемого для связи с шиной процесса, должен быть не хуже Ethernet 100 Base-FX с поддержкой протокола синхронизации времени PTP v2 и протоколов резервирования PRP. Для обеспечения точности работы ЦТТ и ЦТН, устройство должно поддерживать синхронизацию времени по протоколу PTP v2. Точность синхронизации цифрового выхода относительно шкалы UTC SU не должна превышать 1 мкс [6].

Использование протокола МЭК 61850 неразрывно связано с термином “шина процесса”. Это коммуникационная шина данных, к которой подключены устройства полевого уровня подстанции (коммутационные аппараты, измерительные трансформаторы). Применение концепции шины процесса предполагает, что все сигналы, включая мгновенные значения токов и напряжений, оцифровываются непосредственно в аппарате и передаются устройствам защиты и автоматики в виде цифрового потока данных по информа-

ционной сети. На уровне подстанции работает “шина станции”. Функционирование этой шины основано на Ethernet 10 Мбит/с с простой миграцией в Ethernet 100 Мбит/с. Шина станции создает базовые каналы связи между различными логическими узлами, которые обеспечивают различные функции защиты, управления, мониторинга и сбора данных. Для надежности использования сетей в промышленной автоматизации необходимы специальные протоколы, которые повышают надежность и гибкость сети.

В табл. 1 приведен расчетный объем трафика для каждого из протоколов ЦПС, при использовании протоколов GOOSE (англ. Generic Object Oriented Substation Event), MMS (англ. Manufacturing Message Specification), SV (англ. Sampled Values) согласно измерениям, полученным при опытной эксплуатации ПАК ЦПС “SCADA” в типовом исполнении TRACE MODE [7 – 9].

Потоки SV для сети релейной защиты и автоматики показывают, что объединение в рамках шины процесса потоков GOOSE и SV сообщений с использованием VLAN допустимо при использовании сети на 100 Мбит/с. С учетом того, что ЦИУЭ принимает данные с комплекта РЗиА и контроллера присоединений (КП), объем передаваемой информации в ЦИУЭ составляет 10 Кбит/с × 2 устройства, равного 20 Кбит/с. А с учетом резервированного комплекта объем передаваемых MMS сообщений составляет 40 Кбит/с. Передачу данных SV осуществляют по шине процесса, а передачу сообщений GOOSE и MMS — по шине станции. Допускается также передача GOOSE сообщений по шине процесса [10].

Итак, существуют два возможных варианта распределения трафика по шинам: SV + GOOSE — в шине процесса, MMS — в шине станции (здесь и далее “вариант 1”); SV — в шине процесса, GOOSE + MMS — в шине станции (здесь и далее “вариант 2”) [11, 12].

Реализация распределения по “варианту 1” возможна, но при этом необходимо учесть:

на данный момент имеется возможность разделения сервисов MMS и GOOSE с применением RedBox (внешнего или встроенного);

для разграничения трафика потребуется сконфигурировать VLAN, причем топология виртуальной сети GOOSE будет отличаться от топологии виртуальной сети SV, а требования к задержкам приведут к тому, что для каждого VLAN придется настраивать отдельный экземпляр связующего дерева протокола RSTP, чтобы оптимизировать маршруты прохождения SV-потоков и GOOSE-сообщений с точки зрения задержек.

Таблица 1

Расчетный объем трафика

Тип трафика	Расчетный объем
GOOSE сообщение	1 Кбит/с – 1 Мбит/с
MMS сообщение	10 Кбит/с
SV80*	4,5 Мбит/с
SV256*	14 Мбит/с

* Для протоколов SV80 и SV256 принималась средняя длина пакета, равная 140 байт. При этом следует учитывать, что реальная длина пакета SV зависит от реализации протокола.

Передача GOOSE-сообщений в шине станции по “варианту 2” позволяет использовать приоритеты при обработке пакетов, предоставляя GOOSE-сообщениям дополнительную пропускную способность за счет менее критичного трафика MMS.

Оптимальным для организации как шины процесса, так и шины станции является использование протокола PRP с дополнительным резервированием в виде колец RSTP для каждой из PRP-сетей, что позволяет избежать задержек при передаче данных в случае нескольких последовательных отказов.

Результаты анализа топологий:

кольцо RSTP является недорогим решением, но не может быть использовано для организации шины процесса из-за задержек при перестроении топологии от 1 до 5 с. Для срабатывания защит достаточно получить задержку от нескольких миллисекунд при передаче SV-потоков, а требование к задержкам при передаче сигналов управления GOOSE — 3 мс;

наиболее полное резервирование с сохранением всей пропускной способности обеспечивает протокол PRP, но ограничивающим применением является увеличение количества оборудования и использование конечных устройств с протоколом PRP;

для шины процесса строгие требования к надежности, устойчивости и задержкам при передаче как данных измерений, так и цифровых сигналов.

Полученная топология сети программно-аппаратного комплекса цифровой подстанции

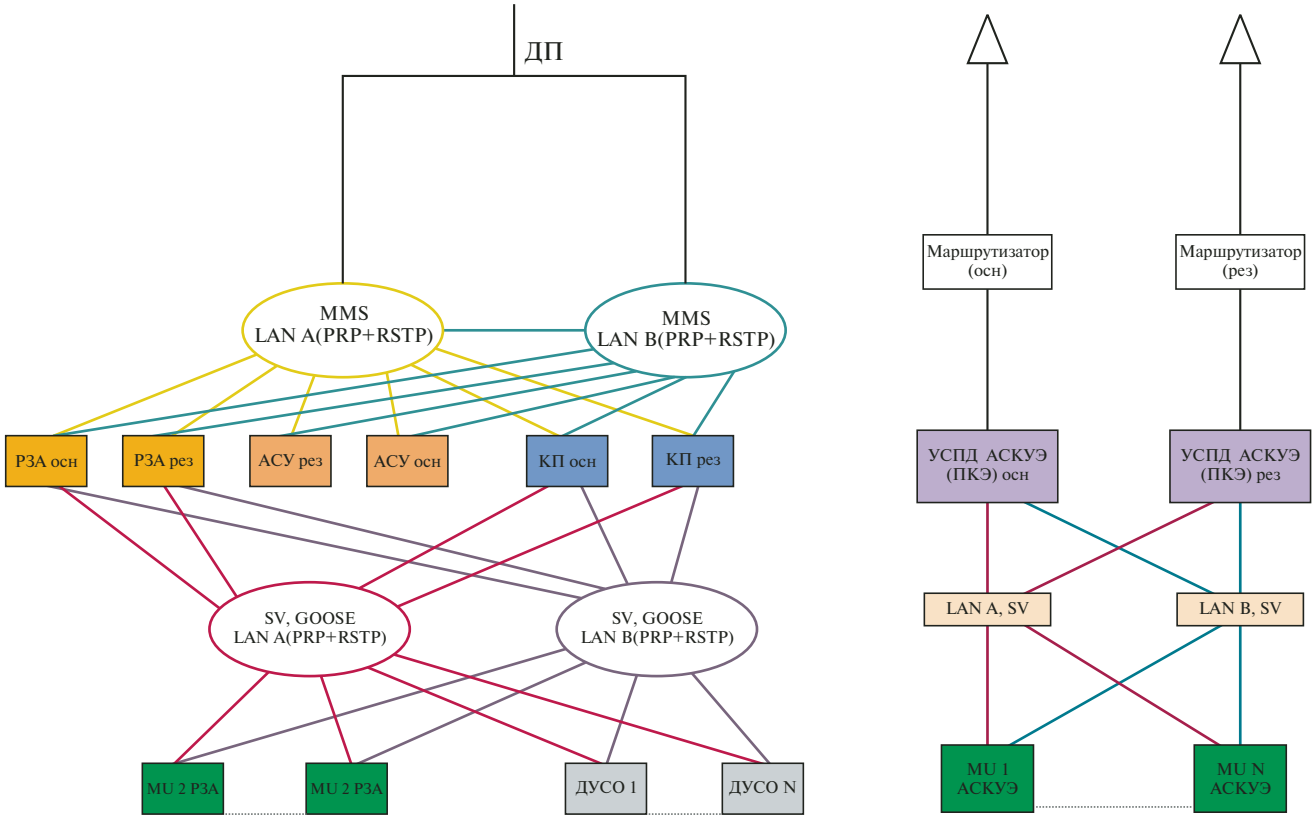


Рис. 1. Структурная схема предлагаемой топологии сети программно-аппаратного комплекса цифровой подстанции

представлена на структурной схеме (рис. 1). Шина процесса должна быть физически отделена от шины станции. Потоки SV должны передаваться только по шине процесса в выделенных VLAN. Сообщения GOOSE — по шине процесса в выделенном VLAN. Сообщения MMS должны передаваться по шине станции. Для резервирования шины процесса и шины станции необходимо использовать протокол PRP совместно с RSTP с целью дополнительного резервирования.

При моделировании предусматривается действие РЗиА на имитационную модель высоковольтного выключателя 6 кВ, предназначенную для передачи и приема цифровых сигналов нефтеперекачивающей станции 110/6 кВ [13, 14].

В табл. 2 и 3 приведены рассчитанные значения токов КЗ, необходимые для выбора определяющих параметров и моделирования высоковольтного выключателя, а также для выбора и оценки устройств РЗиА. Имитационная модель высоковольтного выключателя регистрирует сигнал отключения, передаваемый при использовании протокола МЭК 61850 по оптической линии связи, и время его появления с момента возникновения КЗ.

Функциональная схема имитационной модели высоковольтного выключателя (рис. 2) содержит контуры обратных связей, сформи-

Таблица 2

Рассчитанные токи короткого замыкания для объекта исследования

Величина	Обозначение	Численное значение	
		ВН	НН
Максимальный ток КЗ, приведенный к расчетному напряжению (110 кВ)	$I_{\text{кз.макс}}$, А	$4569\,I_{\text{кз}}^{(3)}$	$7884\,I_{\text{кз}}^{(3)}$
Минимальный ток КЗ, приведенный к расчетному напряжению (110 кВ)	$I_{\text{кз.мин}}$, А	$1366\,I_{\text{кз}}^{(3)}$	$6453\,I_{\text{кз}}^{(3)}$

Таблица 3

Результаты расчета уставок основной защиты трансформаторов для моделирования высоковольтного выключателя

Величина	Обозначение	Численное значение, А
Ток начала торможения		
Ток начала торможения	$I_{Т.0}$	1,0
Чувствительный орган дифференциальной защиты		
Расчетный ток небаланса для первого участка	$I_{нб.расч*}$	0,27
Отстройка от тока небаланса в режиме начала торможения	$I_{Д.0.расч}$	0,351
Принятое значение дифференциального тока для первого участка (0,2 ÷ 1,0)	$I_{Д.0}$	0,35
Ток торможения блокировки		
Ток торможения блокировки ДЗТ	$I_{Т.БЛ.расч}$	1,98
Принятое значение тока торможения блокировки ДЗТ (0,7 ÷ 3,0)	$I_{Т.БЛ}$	2,0

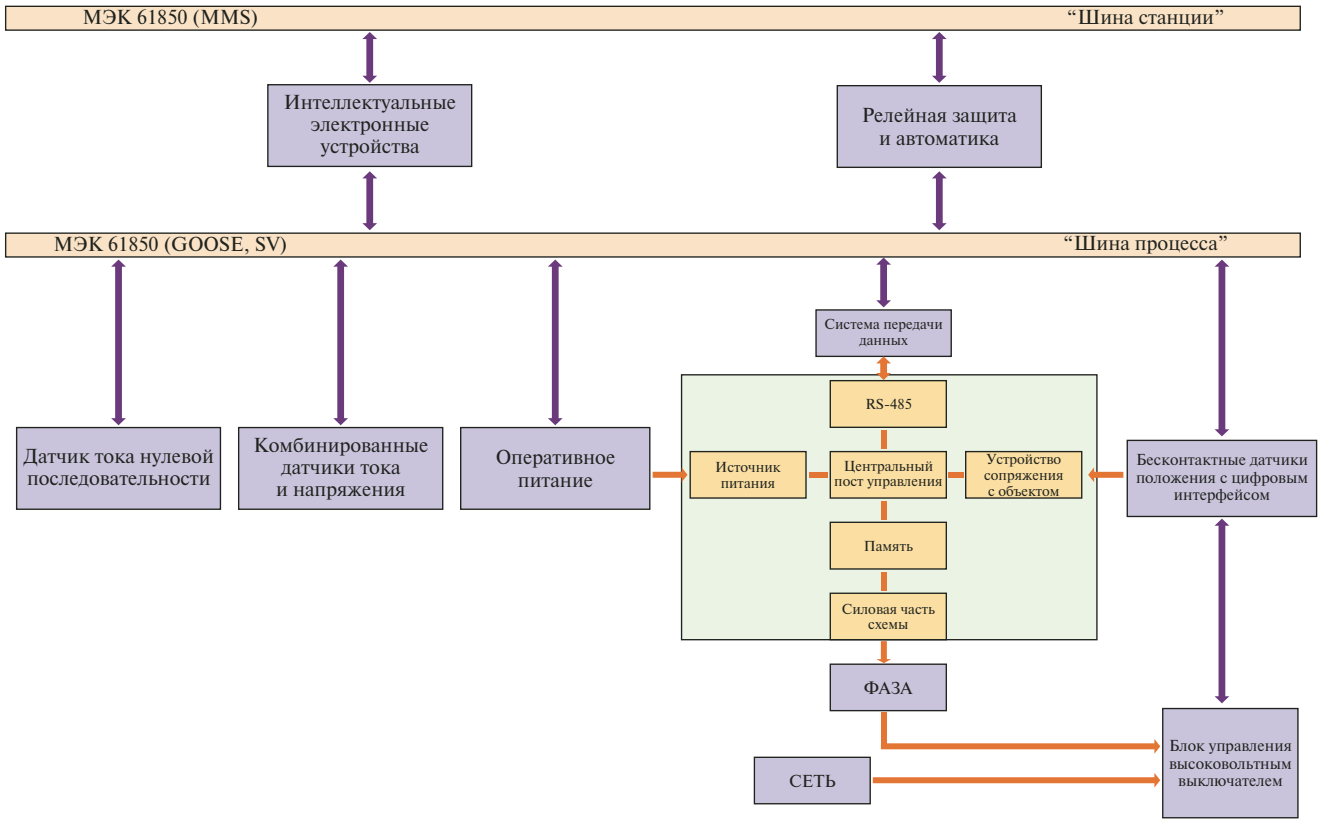


Рис. 2. Функциональная схема имитационной модели высоковольтного выключателя

рованных бесконтактными датчиками положения с цифровым интерфейсом, которые расположены в блоке управления высоковольтного выключателя. Для дальнейшего анализа сигналы с датчиков через устройства сопряжения поступают в микропроцессорный блок с интегрированной памятью, силовой схемой управления и интерфейсом связи

Таблица 4

Интерфейсы коммуникаций устройства сопряжения

Интерфейсы коммуникаций	Интерфейс	Протокол	Назначение
Два RS-485, два Ethernet 10/100 BASE-TX и поддержка протокола МЭК 61850	RS-485 (“61”)	–	–
	RS-485 (“62”)	MODBUS-MT[2]	Связь с программным комплексом
	Ethernet 10/100 BASE – TX (“71/72”)[1]	МЭК 61850[3,4] (MMS, GOOSE, SV)	Связь с автоматизированной системой управления (АСУ)
		MODBUS-MT/TCP	Связь с программным комплексом
		SNTP, PTP (v1, v2)	Синхронизация времени
	USB	MODBUS-MT	Связь с программным комплексом

RS-485. Далее “шина процесса” выполняет обмен информацией между уровнем процесса и уровнем присоединения. Обеспечение заданных параметров имитационной модели высоковольтного выключателя осуществляет программно-аппаратный комплекс [15, 16].

В разработанной имитационной модели высоковольтного выключателя 6 кВ для исследования рассмотренных вариантов передачи данных с использованием различных протоколов МЭК 61850 использовались технические параметры микропроцессорного устройства типа БМРЗ производства НТЦ “Механотроника”, параметры которого представлены в табл. 4.

На основе функциональной схемы проведено имитационное моделирование высоковольтного выключателя для исследования передачи и приема цифровых сигналов в программном пакете Matlab Simulink (рис. 3) [17]. При этом использовались основные элементы для моделирования высоковольтного выключателя:

Simulation time — блок, задающий временно́й интервал моделирования в секундах для приема и передачи цифровых сигналов с использованием различных протоколов МЭК 61850; Compare to Constant — блок сравнения цифрового сигнала с заданной константой; Modulator — блок обработки цифрового сигнала от различных протоколов МЭК 61850 (GOOSE, MMS, SV); Rate Limiter — блок с ограничением скорости, отслеживающий цифровой сигнал в условиях ограничений на скорость нарастания и спада сигнала выходного блока; Display — блок, отображающий цифровые сигналы; Memory — блок памяти, запоминающий цифровой сигнал и смещающий его на один такт времени; Switch — управляемый переключатель цифровых сигналов; Controlled Voltage Source — управляемый источник напряжения, выдающий напряжения в соответствии с сигналом управления; Voltage Measurement — блок измерения напряжения, выполняющий измерение мгновенного значения напряжения между двумя узлами схемы; Current Measurement — блок измерения тока, выполняющий измерение мгновенного значения тока, протекающего через соединительную линию (провод). Порты входа In служат для приема данных подсистемами, а порты выхода Out — для передачи выходных данных в основную модель.

Время передачи цифрового сигнала может быть вычислено при использовании следующего выражения:

$$\Delta T = \Delta T12 - \Delta T34 = \\ = (T1 - T2) - (T3 - T4), \qquad (1)$$

где $\Delta T12$ — временно́й интервал существования короткого замыкания, фиксируемый испытательной имитационной моделью; $\Delta T34$ — время работы функции защиты; $T1$ — момент получения цифрового сигнала; $T2$ — момент возникновения короткого замыкания, зафиксированный испытательной имитационной моделью; $T3$ — момент фиксирования сигнала отключения устройств защиты; $T4$ — момент возникновения короткого замыкания, зафиксированный устройством защиты.

Для выполнения цифровой модуляции в программной среде Matlab Simulink (мгновенных значений напряжения и тока для прото-

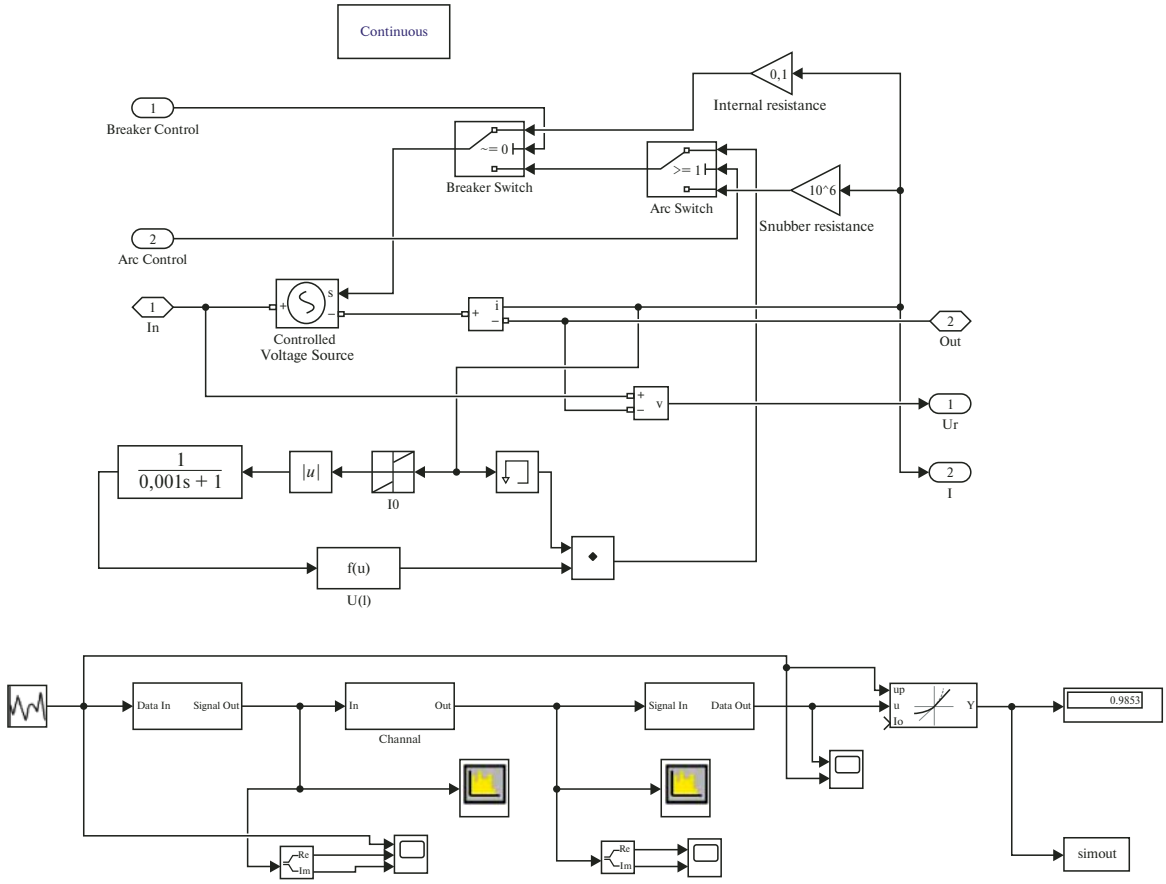


Рис. 3. Имитационная модель высоковольтного выключателя

кола SV) использовались следующие выражения:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi), \qquad (2)$$

где U_m — амплитудное значение напряжения; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; φ — начальная фаза.

$$i(t) = I_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} + \varphi\right) =$$

$$= I_m \sin(2\pi t + \varphi) = I_m \sin(\omega t + \varphi), \qquad (3)$$

где I_m — амплитудное значение тока; T — период синусоиды; $1/T = f$ — циклическая частота.

Действующие значения тока и напряжения для выполнения цифровой модуляции в программной среде Matlab Simulink для протокола MMS получены по формулам:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (I_m^2 \sin^2 \omega t dt)} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I_m^2 \frac{(1-\cos 2\omega t)}{2} dt} =$$

$$= \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\int_0^T di - \int_0^T \cos(2\omega t) dt}; \qquad (4)$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T U_m^2 \sin^2(\omega t) dt} =$$

$$= U_m \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \sin^2(\omega t) dt} =$$

$$= U_m \sqrt{\frac{1}{2T}\int_0^T dt - \int_0^T \cos(2\omega t) dt}. \qquad (5)$$

Для протокола GOOSE стандарта МЭК 61850 дискретный сигнал можно обозначить $u_д(t)$ в отличие от аналогового сигнала $u(t)$:

$$u_д(t) = \sin(2\pi f \cdot nT), \qquad (6)$$

где nT — дискретный момент, следующий строго через интервал T.

Математическая запись любого дискретного сигнала может быть представлена в виде последовательности дискретных δ-импульсов с весовыми коэффициентами, равными от-

Таблица 5

Сравнение времени передачи цифровых сигналов по различным протоколам

Протоколы	GOOSE	MMS	SV
t, с	0,004	0,009	0,005

счетам $u[k]$ аналогового сигнала $u(t)$ в точках kT:

$$u_{д}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u[k] \cdot \delta[n-k]. \qquad (7)$$

В табл. 5 представлены результаты сравнения времени передачи цифровых сигналов по различным протоколам стандарта МЭК 61850. Установлено преимущество скорости передачи сигналов по протоколу GOOSE, что позволит уменьшить время локализации аварийного режима на подстанции (время отключения КЗ).

На рис. 4 представлены значения напряжения и тока, полученные в результате имитационного моделирования высоковольтного выключателя для исследования и приема цифровых сигналов. Время передачи цифровых сигналов в большой степени зависит от времени срабатывания выходного реле устройства-отправителя, а также от времени срабатывания дискретного входа устройства-получателя. Суммарная задержка при учете двух указанных параметров лежит в диапазоне от нескольких миллисекунд до 10 мс. При помощи блока Real-Imag to Complex из двух составляющих формируется цифровой сигнал. Блок Product выполняет перемножение сигналов, что в данном случае приводит к квадратурному переносу спектра.

Выводы

1. Созданная имитационная модель высоковольтного выключателя позволяет принимать и передавать цифровые сигналы по различным протоколам МЭК 61850, что даёт возможность связать всё технологическое оборудование подстанции единой информационной сетью.

2. Разработанная модель дает возможность сократить нагрузку на информационную сеть, обеспечивая быструю передачу сигналов о возникающих в системе событиях, а также сократить число проводных линий связи путем перехода на протокол МЭК 61850, который позволит уменьшить затраты при строительстве и модернизации объектов.

3. На основе разработанной имитационной модели высоковольтного выключателя возможно реализовывать задачи диспетчерского управления и передачу дискретных сигналов между устройствами РЗиА для ин-

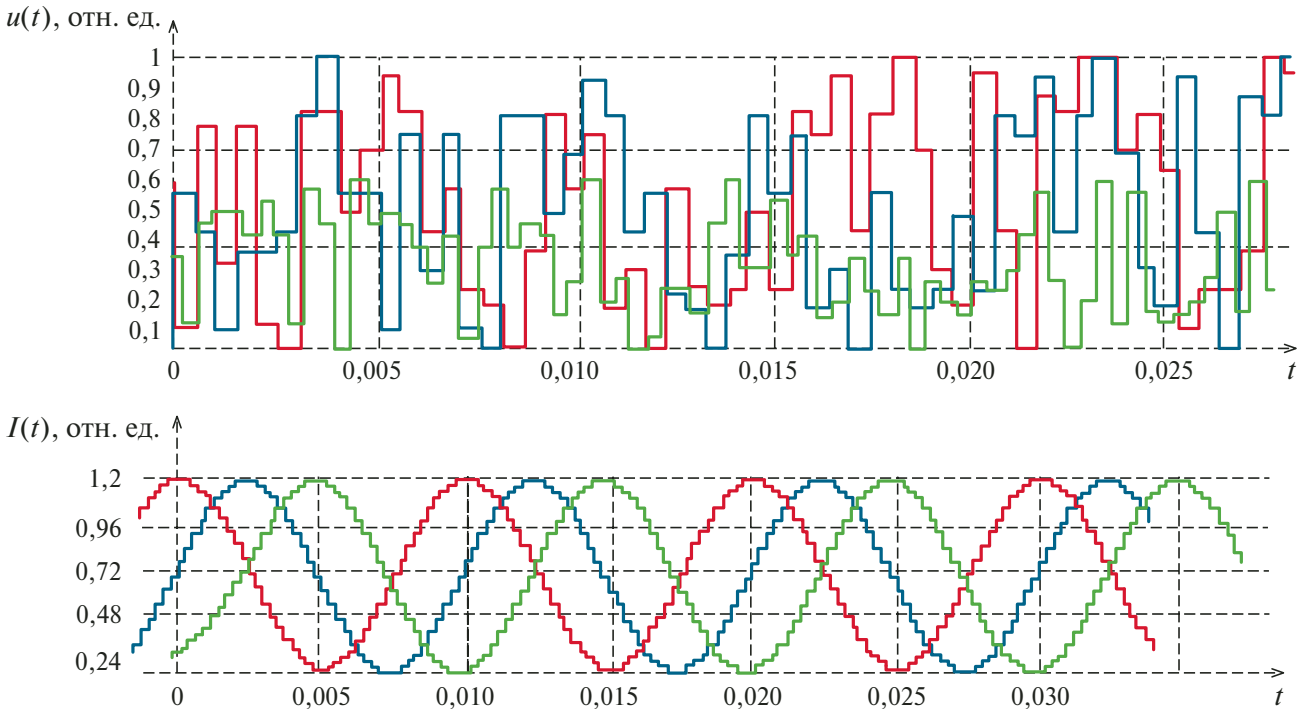


Рис. 4. Значения напряжения и тока высоковольтного выключателя при передаче сигнала по протоколам MMS и SV стандарта МЭК 61850

женеров и проектировщиков нефтегазового комплекса.

4. Предложенная топология обеспечивает быстродействие и уменьшает время срабатывания исполнительной части за счет уменьшения времени аварийного режима.

Список литературы

1. **Аношин, А. О. Протоколы связи в электроэнергетике. Предпосылки для создания стандарта МЭК 61850** / А. О. Аношин, А. В. Головин, Б. К. Максимов // Новости ЭлектроТехники. — 2012. — № 3 (75).
2. **Стандарт организации ПАО "ФСК ЕЭС" СТО 56947007-29.240.10.253–2018:** Типовые методики испытаний компонентов ЦПС на соответствие стандарту МЭК 61850 первой и второй редакций (дата введения: 29.03.2018) [Электронный ресурс] — http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.10.253-2018 new.pdf (дата обращения: 27.01.2020). — 87 с.
3. **Стандарт организации ПАО "ФСК ЕЭС" 56947007-25.040.40.227–2016:** Типовые технические требования к функциональной структуре автоматизированных систем управления технологическими процессами подстанций Единой национальной электрической сети (АСУ ТП ПС ЕНЭС) (дата введения: 26.09.2016) [Электронный ресурс] — https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-25.040.40.227-2016 FSK.pdf (дата обращения: 27.01.2020). — 95 с.
4. **IEC 60044-7:1999 Instrument transformers — Part 7:** Electronic voltage transformers, 1999, 17 December, pages 137, [Электронный ресурс] — URL: //webstore.iec.ch/publication/156 (дата обращения: 27.01.2020).
5. **IEC 60044-8:2002 Instrument transformers — Part 8:** Electronic current transformers (IDT), 2002, 19 July, pages 124, [Электронный ресурс] — URL: //webstore.iec.ch/publication/157 (дата обращения: 28.01.2020).
6. **IEC TR 61850-1: Communication networks and systems for power utility automation — Part 1:** Introduction and overview, 2013, 14 May, pages 73, [Электронный ресурс] — URL: //webstore.iec.ch/publication/6007 (дата обращения: 28.01.2020).
7. **Аношин, А. О. Стандарт МЭК 61850. Протокол GOOSE** / А. О. Аношин, А. В. Головин, Б. К. Максимов // Новости ЭлектроТехники. — 2012. — № 3 (75).
8. **Аношин, А. О. Стандарт МЭК 61850. Протокол MMS** / А. О. Аношин, А. В. Головин, Б. К. Максимов // Новости ЭлектроТехники. — 2012. — № 3 (75).
9. **Концепция развития функций SCADA-системы TRACE MODE на основе технологии экспертных систем принятия и исполнения решений** // журнал "ИСУП", № 1(5) 2005, [Электронный ресурс], http://isup.ru/articles/2/241/ (дата обращения: 28.01.2020).
10. **Аношин, А. О. Исследование функциональной совместимости устройств РЗА по условиям стандарта МЭК 61850** / А. О. Аношин, А. В. Головин, Б. К. Максимов // Релейщик. — 2009. — № 4.
11. **IEC 61850-8-1:2011. Communication networks and systems for power utility automation.** Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM) — Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3, 2011, 17 June, pages 386, [Электронный ресурс] — URL: //webstore.iec.ch/publication/6021 (дата обращения: 29.01.2020).
12. **IEC 61850-9-2:2011. Communication networks and systems for power utility automation.** Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) — Sampled values over ISO/IEC 8802-3, 2011, 22 September, pages 66, [Электронный ресурс] — URL: //webstore.iec.ch/publication/6023 (дата обращения: 29.01.2020).
13. **Стандарт организации ПАО "ФСК ЕЭС" 56947007-29.120.70.241–2017:** Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА (дата введения: 28.02.2017) [Электронный ресурс] — https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.70.241-2017.pdf (дата обращения: 29.01.2020). — 223 с.
14. **Аношин, А. О. Цифровые подстанции. Проблемы внедрения устройств РЗиА** / А. О. Аношин, А. В. Головин, Б. К. Максимов // Новости ЭлектроТехники. — 2012. — № 2 (74).
15. **Бородин, О. С. Противоаварийная автоматика энергосистем, современные технические решения. Стандарт IEC 61850 и его влияние на функции релейной защиты и противоаварийной автоматики** / О. С. Бородин, П. А. Копылов, Ю. В. Иванов, А. Е. Леснов, К. И. Апросин // Энергетик. — 2009. — № 9.
16. **Аношин, А. О. Стандарт МЭК 61850. Протокол передачи мгновенных значений тока и напряжений** / А. О. Аношин, А. В. Головин, Б. К. Максимов // Новости ЭлектроТехники. — 2012. — № 3 (75).
17. **Солонина, А. И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB** / А. И. Солонина, С. М. Арбузов. — СПб.: БХВ-Петербург. — 2008. — 816 с.

References

1. **Anoshin A. O., Golovin A. V., Maksimov B. K. Protokoly svyazi v elektroenergetike. Predposylki dlya sozdaniya standarta MEK 61850** (Communication protocols in the electric power industry. Prerequisites for the creation of the IEC 61850 standard), News of Electrical Engineering, 2012, No. 3 (75).
2. **Standart organizatsii PAO "FSK EES" STO 56947007-29.240.10.253–2018: Tipovye metodiki ispytanii komponentov TsPS na sootvetstvie standartu MEK 61850 pervoi i vtoroi redaktsii** (data vvedeniya: 29.03.2018) (Organization standard of PAO "FSK EES" STO 56947007-29.240.10.253–2018: Typical test methods for CPS components for compliance with IEC 61850 standard of the first and second revisions (introduction date: 29.03.2018), [Electronic resource]. — URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.10.253-2018 new.pdf (accessed: 27.01.2020), 87 p.
3. **Standart organizatsii PAO "FSK EES" 56947007-25.040.40.227–2016: Tipovye tekhnicheskie trebovaniya k funktsional'noi strukture avtomatizirovannykh sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami podstantsii Edinoi natsional'noi elektricheskoi seti (ASU TP PS ENES)** (data vvedeniya: 26.09.2016) (Organization standard of PAO "FSK EES" 56947007-25.040.40.227–2016: Typical technical requirements for the functional structure of automated process control systems for substations of

the Unified National Electric Grid (ASU TP PS ENES) (introduction date: 26.09.2016), [Electronic resource]. — URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-25.040.40.227-2016 FSK.pdf (accessed: 27.01.2020), 95 p.
4. **IEC 60044-7: 1999 Instrument transformers, Part 7**, Electronic voltage transformers, 1999, 17 December, 137 p., [Electronic resource]. — URL: //webstore.iec.ch/publication/156 (accessed: 27.01.2020).
5. **IEC 60044-8: 2002 Instrument transformers, Part 8**, Electronic current transformers (IDT), 2002, 19 July, 124 p., [Electronic resource]. — URL: //webstore.iec.ch/publication/157 (accessed: 28.01.2020).
6. **IEC TR 61850-1: Communication networks and systems for power utility automation, Part 1**, Introduction and overview, 2013, 14 May, 73 p., [Electronic resource]. — URL: //webstore.iec.ch/publication/6007 (accessed: 28.01.2020).
7. **Anoshin A. O., Golovin A. V., Maksimov B. K. Standart MEK 61850. Protokol GOOSE** (Standard IEC 61850. GOOSE protocol), News of Electrical Engineering, 2012, No. 3 (75).
8. **Anoshin A. O., Golovin A. V., Maksimov B. K. Standart MEK 61850. Protokol MMS** (Standard IEC 61850. Protocol MMS), News of Electrical Engineering, 2012, No. 3 (75).
9. **Kontseptsiya razvitiya funktsii SCADA-sistemy TRACE MODE na osnove tekhnologii ekspertnykh sistem prinyatiya i ispolneniya reshenii** (The concept of the development of the functions of the TRACE MODE SCADA system based on the technology of expert decision-making and execution systems), "ISUP" journal, No. 1(5), 2005, [Electronic resource]. — URL: http://isup.ru/articles/2/241/ (accessed: 28.01.2020).
10. **Anoshin A. O., Golovin A. V., Maksimov B. K. Issledovanie funktsional'noi sovmestimosti ustroistv RZA po usloviyam standarta MEK 61850** (Study of the interoperability of relay protection and automation devices according to the conditions of the IEC 61850 standard), Relayshchik, 2009, No. 4.
11. **IEC 61850-8-1:2011. Communication networks and systems for power utility automation**. Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM), Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3, 2011, 17 June, 386 p., [Electronic resource]. — URL: //webstore.iec.ch/publication/6021 (accessed: 29.01.2020).
12. **IEC 61850-9-2:2011. Communication networks and systems for power utility automation**. Part 9-2, Specific communication service mapping (SCSM), Sampled values over ISO/IEC 8802-3, 2011, 22 September, 66 p., [Electronic resource]. — URL: //webstore.iec.ch/publication/6023 (accessed: 29.01.2020).
13. **Standart organizatsii PAO "FSK EES" 56947007-29. 120.70.241–2017: Tekhnicheskie trebovaniya k mikroprotsessornym ustroistvam RZA** (Organization standard of PAO "FSK EES" 56947007-29. 120.70.241–2017: Technical requirements for relay protection and automation devices (introduction date: 02.28.2017), [Electronic resource]. — URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.70.241-2017.pdf (accessed: 29.01.2020), 223 p.
14. **Anoshin A. O., Golovin A. V., Maksimov B. K. Tsifrovye podstantsii. Problemy vnedreniya ustroistv RZiA** (Digital substations. Problems of implementation of RZiA devices), News of Electrical Engineering, 2012, No. 2(74).
15. **Borodin O. S., Kopylov P. A., Ivanov Yu. V., Lesnov A. E., Aprosin K. I. Protivoavariinaya avtomatika energosistem, sovremennye tekhnicheskie resheniya. Standart IEC 61850 i ego vliyanie na funktsii releinoi zashchity i protivoavariinoi avtomatiki** (Emergency automation of power systems, modern technical solutions. IEC 61850 standard and its influence on the functions of relay protection and emergency automation), Energetik, 2009, No. 9.
16. **Anoshin A. O., Golovin A. V., Maksimov B. K. Standart MEK 61850. Protokol peredachi mgnovennykh znachenii toka i napryazhenii** (Standard IEC 61850. Protocol for the transfer of instantaneous values of current and voltage), News of Electrical Engineering, 2012, No. 3 (75).
17. **Solonina A. I., Arbuzov S. M. Tsifrovaya obrabotka signalov. Modelirovanie v MATLAB** (Digital signal processin g. Modeling in MATLAB), St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2008, 816 p.

maxmutova95@mail.ru

Models of digital signal transmission processes using different IEC 61850 protocols

Vlasova E. P., Khmara G. A., Makhmutova V. R.

Development of the new international standards and information technologies opens novel opportunities for modern approaches to creating a digital substation. The use of digital substation technology, based on IEC 61850 standard, should provide a significant reduction in the cost of design, commissioning, operation and maintenance of energy facilities. We developed a simulation model of a high-voltage circuit breaker which can reduce the load on the information network thus providing an increase in the signal transmission rate between the relay protection devices and primary equipment of the substation, as well as reduce the number of wirelines by switching to IEC 61850 protocol and decrease construction and modernization costs. The developed model provides implementation of the goals of supervisory control and transmission of the digital signals between the relay protection and automation devices for engineers and designers of the oil and gas complex. The resulting topology of the digital substation network increases the rapidity of action and reduces the response time of the executive part by reducing the emergency mode period (short circuit trip time).

Keywords: Digital Substation (DSS), IEC 61850 protocol, simulation model of a high-voltage circuit breaker, intelligent electric power industry, network topology of the hardware and software complex of a digital substation, traffic types for DSS protocols, process bus, station bus.

DOI 10.34831/EP.2020.52.85.003

Моделирование теплообмена в капиллярно-пористых покрытиях в энергоустановках

Генбач А. А., доктор техн. наук, Бондарцев Д. Ю., канд. техн. наук
Алматинский университет энергетики и связи, Республика Казахстан, Алматы

Шелгинский А. Я., доктор техн. наук
НИУ "МЭИ", Москва

Изучены предельные тепловые потоки в сетчатых пористых структурах на примере горелки ракетного типа при охлаждении водой ее камеры сгорания и сопла. Получены экспериментальные данные и расчетные зависимости для кризиса кипения, выбран оптимальный гидравлический размер пор структуры. Проведен анализ влияния гравитационного и капиллярного потенциалов в пористых структурах с учетом критического влагосодержания. Показано, что рассматриваемая система охлаждения отводила тепловые потоки значительно большей плотности, чем в тепловых трубах. Установлены критические значения высоты теплообменной поверхности и толщины пористой структуры. Результаты теоретических исследований хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными.

Ключевые слова: кризис теплопередачи; капиллярно-пористая структура; тепловые энергоустановки; паровой пузырь; капиллярные силы; массовые силы; управление теплопередачей; проницаемость.

Системы охлаждения различных энергоустановок на основе капиллярно-пористых материалов привлекают внимание многих исследователей и изобретателей, создающих на их основе различные устройства. Вследствие интенсификации протекающих в них процессов [1 – 4] повышается плотность отводящих тепловых потоков. Использование пористых материалов помимо систем охлаждения позволяет создавать агрегаты для решения проблем взрывобезопасности, охраны труда и долговечности [5 – 9]. Этому способствует возможность управлять процессами парообразования за счет избытка жидкости в порах капиллярных структур, создаваемого совместными действиями капиллярных и массовых сил [1, 2].

В тепловых энергетических установках (ТЭУ) капиллярно-пористые материалы используются для охлаждения высокофорсированных детонационных горелочных устройств [2], создания пароохладителей в паровых котлах, маслоохладителей (исключение попадания масла в охлаждающую воду), системы охлаждения подшипников, лабиринтных уплотнений и других устройств [3, 4].

Капиллярно-пористые системы позволяют экономить топливо, сырье, воздух, воду, теплоту, повысить надежность охлаждения и взрывопожаробезопасность работы оборудования, способствуют высокоэффективному разрушению горных пород, бетонов, металлов, уменьшению низкотемпературной коррозии поверхностей, сокращению загрязнения биосферы ядовитыми газами, пылью, теплотой, обеспечивают существенный экономический и социальный эффекты в области экологии и охраны труда [3, 4].

Основными преимуществами капиллярно-пористых систем являются высокая интенсивность процессов теплообмена, большая теплопередающая способность, надежность, компактность, простота в изготовлении и эксплуатации. Они характеризуются улучшенными режимными и технологическими показателями, невысокими капитальными и эксплуатационными расходами.

Авторы [5] выполнили сравнительный анализ методов расчета теплоотдачи по кипению воды с недогревом в вертикальных каналах, причем они считают очаговую коррозию оболочек ТВЭЛ ядерных реакторов аналогом капиллярно-пористой структуры [6, 7]. Однако исследования теплообмена по регулярной структурированной поверхности не проводились. По мнению авторов [8, 9], поверхностное кипение на пористых поверхностях может влиять на развитие коррозии из-за эрозионного воздействия на поверхность теплообмена при схлопывании пузырей пара в недогретой жидкости. Поэтому требуется ис-

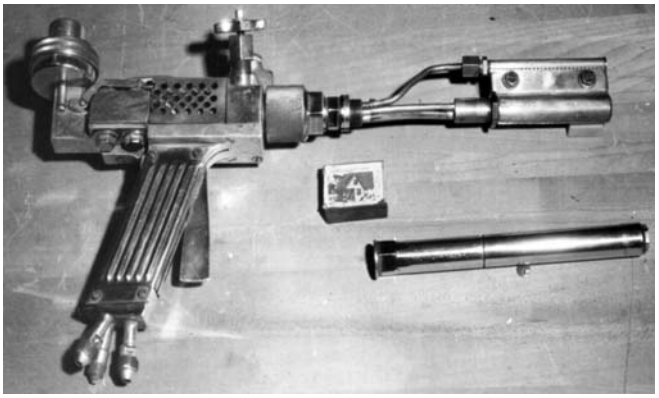


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки, выполненной в виде огнеструйной горелки ракетного типа

следовать парообразование жидкости в капиллярно-пористых структурах в поле капиллярных и массовых сил с учетом скорости движения и недогрева, которые создаются избытком жидкости. Оценка интенсивности теплообмена для кипения жидкости в большом объёме и на тонких пленках на гладкой поверхности установила их разные показатели при высокой плотности тепловых потоков и более высокие показатели теплопередачи, чем у систем с капиллярно-пористым покрытием [5 – 9]. Проведенные исследования позволяют дать рекомендации по выбору теплоносителя, учесть вид его циркуляции, определить геометрию и материал аппаратов, интенсификаторов теплообмена с учетом условий и ориентаций работы системы под давлением или разрежением, подводом и видом энергии, ориентации системы.

В данной работе анализируются теплопередающие возможности капиллярно-пористых покрытий, работающих в поле капиллярных и массовых сил, и значения предельных (критических) нагрузок, приводящих к разрушению поверхностей нагрева. Предлагается методика исследования капиллярно-пористых систем применительно к различным элементам энергоустановок. Системы отличаются тем, что имеют преимущественно гравитационный подвод жидкости и по интенсивности теплопередачи занимают промежуточное положение между тонкопленочными и пористыми испарителями с преимущественно капиллярным подводом жидкости (тепловыми трубами). Поэтому такие системы следует выделить в отдельный класс теплоотводящих систем [1 – 4].

Исследования различных факторов, влияющих на теплообмен в структурах, показывают, что особый интерес вызывают предельные (критические) состояния поверхности нагрева, когда система способна переносить максимальные потоки энергии и вещества. Однако в этом случае требуется определить значения тепловых потоков и термических напряжений с целью обеспечения надежной и долговечной работы установки [10 – 15]. Например, можно определить максимальный перенос энергии и вещества для следующего условия: используется чистая жидкость, циркулирующая по принудительной схеме в закрытых эллиптических теплообменниках под давлением в перфорированных и профилированных поверхностях нагрева, выполненных из нержавеющей стали. Система работает с избытком жидкости, а наличие массовых сил обеспечивает вынужденное течение теплоносителя с недогревом. Энергия подводится к вертикально расположенной поверхности по периметру сверхзвуковым высокотемпературным пульсирующим вращающимся факелом [2].

Экспериментальная установка

Для исследования критических тепловых потоков в пористой системе охлаждения использовалась ракетная горелка, содержащая камеру сгорания и сверхзвуковое сопло (рис. 1), которые охлаждаются капиллярно-пористой системой. Пористыми покрытиями были защищены камера сгорания и сопло (они имитируют подобные устройства газовых турбин). Тепловое воздействие на покрытие осуществлялось сверхзвуковым (со скоростью до 2000 м/с) высокотемпературным (до 2500 °С) пульсирующим факелом. Для измерения теплового потока q_i, использовали теплоприемник, состоящий из медного цилиндра, который с одного торца воспринимал действие газовой струи, а с другого — охлаждался водой. В качестве изолятора применялась керамика из диоксида циркония. В медном цилиндре размещались хромель-копелевые термопары. Методика измерения температур и расходов жидкости, а также применяемые измерительные приборы описаны в работе [1]. Невязка теплового баланса не превышала ± 12 %, максимальная относительная погрешность определения q_i не превышала ± 7 %. Координатное устройство, закрепленное на горелке, позволяло устанавливать пятно торможения (растекания) газовой струи в области термодатчика.

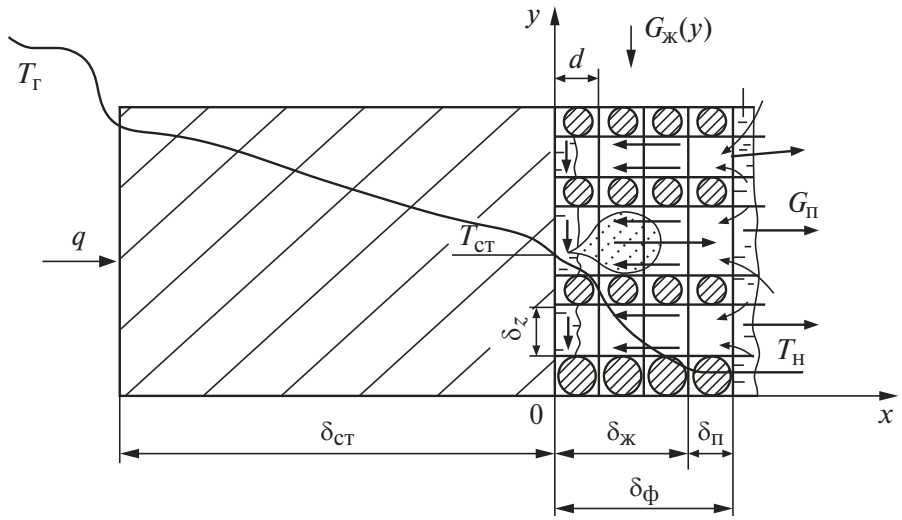


Рис. 2. Физическая модель процессов тепломассопереноса в пористой структуре, покрывающей охлаждаемую поверхность: q — тепловой поток; $T_г$, $T_{ст}$, $T_н$ — температуры газов, стенки, насыщения; $G_ж(y)$, $G_п$ — расход жидкости и пара; $\delta_{ст}$, $\delta_ф$, $\delta_ж$, $\delta_п$ — толщина парогенерирующей поверхности, пористого покрытия, жидкости и пара; b_z, d — ширина ячеек пористого покрытия и диаметр зерен

Математическая модель

Модель капиллярно-пористого покрытия, нанесенного на охлаждаемую поверхность теплонагруженного элемента энергоустановки, показана на рис. 2. При наступлении кризиса кипения возникает предельное состояние поверхности нагрева и происходит её разрушение вместе с покрытиями. Такая схема позволяет моделировать разрушение хрупких покрытий и пластических пористых структур. Одним из важных элементов энергоустановки является система охлаждения камеры сгорания и соплового аппарата.

Для определения предельных тепловых потоков, отводимых пористой системой охлаждения, рассмотрим уравнения неразрывности и движения с учетом совместного действия гравитационных и капиллярных сил, причем силы гравитации создают избыток жидкости $\tilde{m} = m_ж / m_п$ (здесь $m_ж$ и $m_п$ — расходы жидкости и пара, кг/с).

$$\frac{dV_y}{dy} = -\frac{\rho_п}{\rho_ж}\frac{L}{\varepsilon F_ф} V_x (m_п / m_ж + 1); \qquad (1)$$

$$V_y \frac{dV_y}{dy} = g\cos\beta + \frac{2\sigma}{\rho_ж}\frac{d}{dy}\left(\frac{1}{R(y)}\right) - \varepsilon \nu_ж V_y / K, \quad (2)$$

где V_y — скорость жидкости по направлению сил гравитации g, м/с; y — координата (направление движения жидкости), м; $\rho_п$ и $\rho_ж$ — плотности пара и жидкости, кг/м^3; L — длина парогенерирующей поверхности, м; ε — пористость; $F_ф$ — сечение пористой структуры, м^2; V_x — скорость пара по координате x, м/с; x — координата (направление движения пара), м; β — угол наклона системы охлаждения к вертикали, град.; σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; $R(y)$ — радиус мениска жидкости, м; $\nu_ж$ — коэффициент кинематической вязкости жидкости, м^2/с; K — проницаемость, м^2.

Подставляя уравнение (1) в уравнение (2) с учетом величин $V_y = G_ж(y)/\rho_ж$, $V_x = q_{кр}/r\rho_п$ и проинтегрировав полученное уравнение в пределах от $y_1 = 0$ до $y_2 = H$ и от $R_0 = \infty$ до $R_h = b_г/2$, получаем:

$$3q_{кр}^2 h^2 (m_п / m_ж)/2[r\varepsilon\delta_ф\rho_ж]^2 \varphi'^2_{кр} - $$
$$-3q_{кр} h^2 \nu_ж / 2r\delta_ф\rho_ж k\varphi'_{кр} + $$
$$+\left(gh\cos\beta + \frac{2\sigma}{\rho_ж R_h}\right) = 0. \qquad (3)$$

Решением квадратичного уравнения (3) является выражение, которое определяет первый критический тепловой поток слабонедогретой и насыщенной жидкости ($\tilde{m} \to 1$):

$$q_{кр} = [B \pm (B^2 - 4AC)^{0,5}]/2A, \qquad (4)$$

где $q_{кр}$ — критический (предельный) тепловой поток, Вт/м^2; r — теплота парообразования, Дж/кг; b_z — гидравлический диаметр пор структуры, м; h — высота парогенерирующей поверхности, м; $\varphi'_{кр}$ — критическое расходное влагосодержание;

$$A = 3h^2(m_п / m_ж + 1)/2(r\varepsilon\delta_ф\rho_ж)^2\varphi_{кр};$$

$$B = 3h^2\nu_ж/2r\delta_ф\rho_ж K\varphi_{кр};$$

$$C = gH\cos\beta + 2\sigma/\rho_ж R_h.$$

Из уравнения (4) определим наибольшую высоту теплообменной поверхности h, при которой наступит гидродинамический кризис теплообмена. В качестве переменных будут выступать величины $\delta_ф$, K, b_z, H, P, где $\delta_ф$ — толщина фитиля; H — текущая высота; P — давление.

Рассмотрим два экспериментальных случая, имевших место в опытах: $\delta_{ф1} = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м и $\delta_{ф2} = 0{,}15 \cdot 10^{-3}$ м. Для величины $\delta_{ф1}$ получаем:

$$\varphi_{кр}/h^2 = 140{,}4/(9{,}81H + 0{,}447), \qquad (5)$$

где $K = 5{,}8 \cdot 10^{-10}$ м^2, $b_z = 0{,}55 \cdot 10^{-3}$ м; $P = 0{,}1$ МПа. Поскольку величины H и $\delta_ф$ связаны соотношением

$$H\delta_ф = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м, то } 10 \text{ м} \le H \le 100 \text{ м}.$$

При $H = 10$ м,

$$\varphi_{кр} = 0{,}1, \quad h = h_{max} = 0{,}26 \text{ м}.$$

Для величины $\delta_{ф2}$ уравнение имеет следующий вид

$$\varphi_{кр}/h^2 = 1386/(9{,}81H + 1{,}76). \qquad (6)$$

При $H = 100$ м, $\varphi_{кр} = 0{,}1$ получаем близкое значение высоты теплообменной поверхности ($h_{max} = 0{,}266$ м).

Рассмотренные примеры относятся к случаю, когда вся охлаждающая жидкость движется в свободном сечении пористой структуры ($K = K_{т.т}$). Уравнения (5) и (6) связывают гидростатический напор с высотой теплообменной поверхности.

Решим уравнение (4) относительно $\varphi_{кр}/h^2$ для случая, когда часть жидкости за счет ее избытка может стекать по поверхности пористого тела, т. е. коэффициент $K = K_у$.

В этом случае потребуется незначительное внешнее давление, создаваемое высотой столба жидкости H, и капиллярный потенциал будет существенно превышать гравитационный потенциал: $\rho_ж gH \ll 2\sigma/R_h$. Тогда величины H и $\delta_ф$ не будут связаны между собой. Для этого случая решением уравнения (4) будет:

для $\delta_{ф1} = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м

$$\varphi_{кр}/h^2 = 0{,}126(9{,}81H + 0{,}47); \qquad (7)$$

для $\delta_{ф2} = 0{,}15 \cdot 10^{-3}$ м

$$\varphi_{кр}/h^2 = 17{,}4/(9{,}81H + 1{,}76). \qquad (8)$$

При $H = 10$ м и $\varphi_{кр}/h^2 = 0{,}1$, получим значения высот поверхности нагрева: $h_{max1} = 2{,}86$ м и $h_{max2} = 0{,}758$ м, т. е. для тонких структур кризис кипения наступит при меньших значениях h.

Решение уравнения (4) требует большую точность расчета, но отбросив первый член уравнения, можно с практически такой же степенью точности решить данное уравнение. Тогда уравнение (4) примет следующий вид:

$$q_{кр} = C/B = 2\varphi'_{кр} r\delta_ф\rho_ж k\left(gH\cos\beta + \frac{2\sigma}{\rho_ж R_h}\right)/3h^2\nu_ж. \qquad (9)$$

В уравнении (9) в явном виде не содержится отношение $m_ж/m_п$, однако оно учитывается через величины $\varphi_{кр}$ и K. При $\varphi_{кр} \to 0$ величина $q_{кр} \to 0$, т. е. в пограничном слое пористой структуры испарится почти вся влага и наступит кризис кипения.

Решение уравнения (9) относительно высоты столба жидкости представляет интерес для обоих случаев гидродинамики жидкости: $K = K_{т.т}$ и $K = K_у$. Когда вся жидкость движется в живом сечении пористой структуры ($K = K_{т.т}$), требуется создавать достаточно большое давление. Для исследованной системы охлаждения, когда $h = (0{,}1 - 0{,}7)$, $\delta_ф = (0{,}15 - 1{,}5) \cdot 10^{-3}$ м, $b_z = (0{,}08 - 1) \cdot 10^{-3}$ м, при $\varphi'_{кр} = 0{,}1$ значение H составляет десятки метров водяного столба. Во втором случае, когда создается избыток жидкости при свободном ее стекании по внешней поверхности пористой структуры ($K = K_у$), превышение столба жидкости составляет несколько десятков миллиметров.

Условие $\rho_ж gH \ll 2\sigma/R_h$ может иметь место не только при горизонтальном расположении систем охлаждения, но и в том случае, когда часть жидкости стекает по внешней поверхности пористой структуры ($K = K_у$).

Из формулы (9) не следует делать вывод, что бесконечно увеличивая гидростатический напор $\rho_ж gH$, можно также увеличивать величину $q_{кр}$, так как при этом величина K может потерять физический смысл проницаемости, поскольку основной расход жидкости будет находиться вне живого сечения структуры, свободно стекая по пористому материалу. К тому же при $q \le 6 \cdot 10^4$ Вт/м^2 произойдет перераспределение теплоты,

отбираемой парообразованием и конвекцией, вплоть до вырождения процесса кипения.

При $q \to q_{кр}$, несмотря на большое количество жидкости $G_ж = F[H]$, возникают кризисные явления, которые приводят к пережогу и разрушению теплообменной поверхности. На рис. 3 *1* и *2* — водяное охлаждение ($q_{кр.сеч} = 1 \cdot 10^6$ Вт/м^2, $W = 10$ м/с); *3* — укороченное сопло с утолщением стенки и капиллярно-пористым охлаждением ($q_{кр.сеч} = 1 \cdot 10^6$ Вт/м^2).

В этом случае в уравнении (9) будет выполнено неравенство $\rho_ж g H \gg 2\sigma/R_h$ и потребуется ввести множитель $K/K_у$. В случае, когда $\rho_ж g H \approx 2\sigma/R_h$, величина $\Delta P_{g+k} = (1,5 - 2)\, 2\sigma/R_h$, а величина H составляет несколько десятков миллиметров в зависимости от толщины структуры.

Установим связь $h = f(\underline{H})$. Пусть $K = K_{т.т} = 5{,}8 \cdot 10^{-10}$ м^2. Для $\delta_{ф1} = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м из уравнения (5) получаем:

$$h = (0{,}32 - 1)(0{,}0699H + 3{,}18 \cdot 10^{-3})^{0{,}5}. \quad (10)$$

Для величины $\delta_{ф2} = 0{,}15 \cdot 10^{-3}$ м из уравнения (6) имеем:

$$h = (0{,}32 - 1)(7{,}1 \cdot 10^{-3}H + 1{,}27 \cdot 10^{-3})^{0{,}5}. \quad (11)$$

Здесь предполагается, что массовое влагосодержание может изменяться от момента начала закипания ($\varphi \to 1$) до кризиса кипения ($\varphi = \varphi_{кр} \to 0{,}1$) [16]. Выполненный анализ позволяет определять высоту теплообменной поверхности и толщину пористой структуры, которым соответствует критическая тепловая нагрузка. Учет кипения в пористом теле осуществляется с помощью расходного влагосодержания φ и параметра $\tilde{m}$, который создает направленное течение недогретой жидкости с незначительной скоростью и позволяет обеспечить устойчивость двухфазного потока в пограничном пульсирующем слое жидкости.

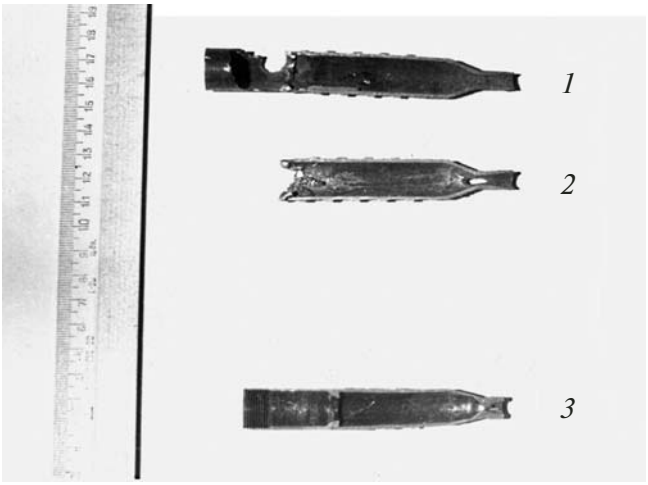


Рис. 3. Разрушенные камеры сгорания, сопла и "юбки":
1 и *2* — водяное охлаждение; *3* — укороченное сопло с утолщением стенки и капиллярно-пористым охлаждением

Результаты

Представляем расчетные величины $q_{кр}$ и соответствующие им величины $\Delta T_{кр}$ для различных давлений. Из физических соображений в уравнении (4) оставляем знак "–". Оценка перепада температур в пористой структуре необходима для устойчивой работы системы охлаждения. Такая оценка достаточно сложна, что связано с трудностью определения эффективного коэффициента теплопроводности в момент кризиса кипения, зависящего от многих факторов, главными из которых являются наличие пароводяной смеси в пограничном слое, контактное сопротивление между скелетом структуры и стенкой и между элементами самого скелета, которое может изменяться от степени прижатия структуры к стенке и от изменения температурного уровня работы, что приводит к тепловому расширению проволоки сетки. К тому же в кризисном режиме толщина слоя жидкости является величиной неопределен-

Критические тепловые нагрузки и соответствующие температурные напоры

Параметр	P, МПа			
	0,01	0,1	8	20
1. $q_{кр}$, Вт/м^2				
а) $K = K_{т.т}$	$2{,}95 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^5$	$6{,}9 \cdot 10^5$	$1{,}66 \cdot 10^5$
б) $K = K_у$	$3 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	$2{,}5 \cdot 10^5$	$5{,}8 \cdot 10^3$
2. $\Delta T_{кр}$, K	14,2	60	55,2	7,75

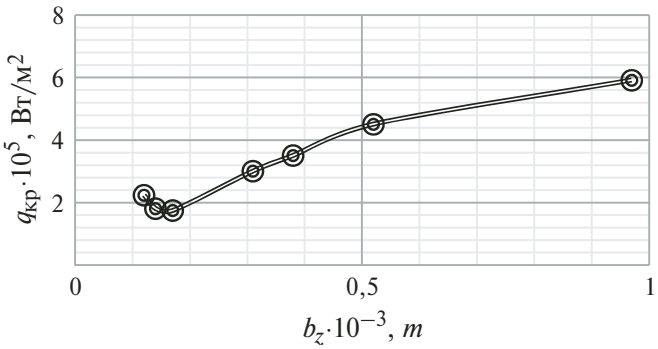


Рис. 4. Влияние ширины ячейки сетчатой структуры на критический тепловой поток при кипении воды

ной. Поэтому расчет величины $\Delta T_{кр}$ не может быть осуществлен аналитическим путем. Он стал предметом экспериментальных исследований (см. таблицу).

Исходными данными для расчета являлись: $H = 10$ м, $\cos\beta = 1$, $R_h = 0{,}275 \cdot 10^{-3}$ м, $\varphi_{кр} = 0{,}1$, $\delta_ф = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м, $K = 5{,}8 \cdot 10^{-10}$ м^2, $h = 0{,}27$ м. Предполагалось, что охлаждающая жидкость заполняет живое сечение структуры и не стекает по пористому телу. Конструктивно это реализуется путем создания канала и установкой внутри его пористой структуры. Если создается избыток жидкости $\tilde{m}$ и часть ее может свободно стекать по внешней поверхности пористого тела, необходимо ввести условный коэффициент проницаемости $K_у$.

Сравнивая приведенные данные видим, что в случае (δ) для высоких давлений наблюдается более сильное влияние P на величину $q_{кр}$, поскольку начинает сказываться быстрое падение коэффициента σ.

Таким образом, с помощью наложения гравитационного потенциала можно расширить величину $q_{кр}$ и стабилизировать зависимость $q_{кр} = f(p)$ для широкого диапазона изменения давления (0,01 – 20 МПа), что особенно важно, когда система работает под высоким давлением.

Влагосодержание φ оказывает влияние на значение $q_{кр}$ через отношение $\tilde{m}$. Величина $\varphi_{кр}$ изменялась в диапазоне 0,1 – 0,15.

Результаты эксперимента хорошо согласуются с результатами расчета по уравнению (4), которое получено на основе гидродинамического анализа процессов теплообмена, где не учитываются локальные ограничения по тепловому потоку, когда контакт жидкой пленки с поверхностью невозможен из-за сильного перегрева этой поверхности за время роста парового пузыря (рис. 4). Сетка и стенка изготовлены из нержавеющей стали. Опыты проведены для следующих условий:

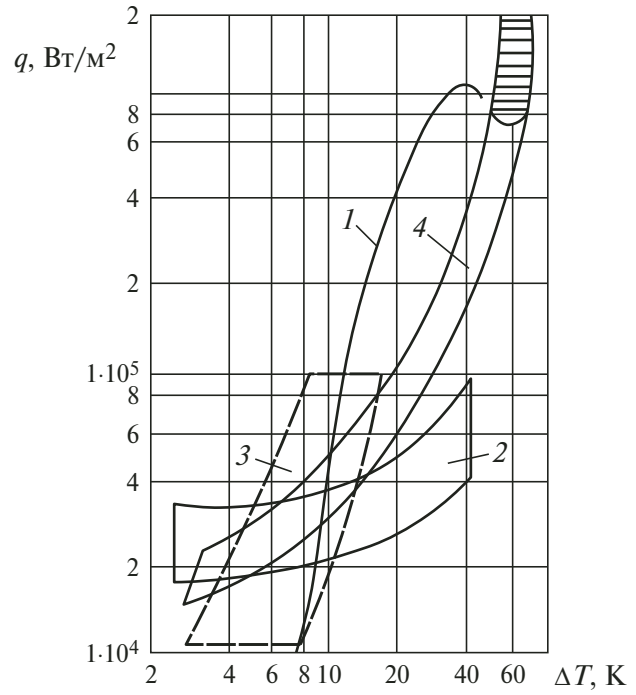


Рис. 5. Влияние плотности теплового потока на перегрев стенки относительно температуры водяного пара при $P = 0{,}1$ МПа:

1 — кипение в большом объёме на поверхности без покрытия [5 – 8, 15]; *2* — область работы тепловых труб [9 – 11, 14] с сетчатыми фитилями; *3* — область работы тонкопленочных испарителей [5]; *4* — область работы исследованной пористой системы охлаждения; заштрихованная область — применение интенсификаторов в пористой системе [1 – 4]

$h = 0{,}27$ м; $\tilde{m} = m_ж / m_п$; $P = 0{,}1$ МПа; $\beta = 0$. Исследованы структуры вида: *1* — $0{,}08 \times 0{,}14$; *2* — $0{,}08 \times 0{,}14 \times 0{,}28$; *3* — $3 \times 0{,}14$; *4* — $2 \times 0{,}28$; *5* — 0,4; *6* — 0,55; *7* — 1×1. Числа, записанные в виде произведения, означают размер ячейки сетки на просвет каждой сетки, мм, а знак умножения означает, что сетки устанавливаются последовательно, считая от поверхности нагрева, образуя анизотропную структуру. Если записано одно число, это значит, что установлена одна сетка с соответствующим размером ячейки на просвет.

В результате экспериментальных исследований [2] показано, что учет гидродинамических возможностей теплопереноса при расходе жидкости, превышающем в 1,5 – 2 раза требуемый в зависимости от вида структуры, является правомерным. При этом в системе отводятся тепловые потоки плотностью в 2 – 8 раз большие, чем в тепловых трубах с сетчатой структурой при развитом пузырьковом кипении (рис. 5).

Для тепловых труб, как отмечают большинство исследователей, удельный массовый поток жидкости $G_{кр}$ ограничен предельным

значением капиллярного давления и определяет гидродинамическую границу теплопередающей способности. В исследуемой системе такого ограничения нет. Величина $G_{кр}$ определяется значением действующего напора $\Delta P_{g+k} = \rho_ж gH + 2\sigma/R_{мин}$.

Таким образом, для инженерных расчетов при отводе тепловых потоков плотностью до $q_{кр}$ при развитом процессе кипения можно пользоваться уравнением (4). Для этого необходимо знать давление, геометрию системы охлаждения и вид пористой структуры.

Итак, используя систему дифференциальных уравнений, за счет ввода в общий градиент давления вязкостного члена на основании закона Дарси и учета истинной скорости жидкости в пористой структуре с помощью влагосодержания $\varphi_{кр}$ решена задача по определению критических тепловых нагрузок в пористых системах охлаждения, в которых наряду с капиллярным потенциалом действует потенциал гравитационных сил. Исследования проведены для двух случаев: жидкость движется только в сечении пористой структуры и жидкость может свободно стекать по поверхности пористого тела. Следовательно, величины $\varphi_{кр}$, $K_у$ и параметр $\tilde{m}$ учитывают влияние гравитационных сил, выраженное через скорость потока жидкости (направленное течение) и возможный недогрев жидкости до температуры насыщения.

Выводы

1. Рассмотренный кризис теплообмена в пористой системе охлаждения представлен на основе гидродинамических условий при совместном действии гравитационных и капиллярных сил. Предложена модель кризиса теплообмена, полученная с помощью системы дифференциальных уравнений, описывающих одномерное течение однофазной жидкости, отражает физическая картина процесса за счет ввода в общий градиент давления вязкого члена и учета истиной скорости жидкости в пористой структуре с помощью расходного влагосодержания, что позволило получить расчетную формулу.

2. Установлены критические значения высоты теплообменной поверхности и толщины структуры для двух режимов гидродинамики жидкости в пористых структурах, которым отвечает минимальное значение гидростатического напора, создающего оптимальное соотношение избытка жидкости в зависимости от геометрических и режимных параметров.

3. Результаты теоретических исследований хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными и могут быть широко использованы при расчете и проектировании систем охлаждения теплонапряженного энергетического оборудования.

Список литературы

1. **Генбач, А. А. Обобщение процессов теплопередачи и их сравнительная оценка для капиллярно-пористых покрытий в энергоустановках** / А. А. Генбач, Д. Ю. Бондарцев, А. Я. Шелгинский // Надежность и безопасность энергетики. — Том 12. — № 1. — 2019. — С. 29 – 35.
2. **Генбач, А. А. Научная методика создания капиллярно-пористых систем охлаждения для элементов теплоэнергооборудования электростанций** / А. А. Генбач, Д. Ю. Бондарцев // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. — Сер. Машиностроение. — 2019. — № 3, с. 89 – 106. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-89-106.
3. **Генбач, А. А. Моделирование термических напряжений, разрушающих пористые покрытия теплообменных поверхностей энергоустановок** / А. А. Генбач, Д. Ю. Бондарцев // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. — 2019. — **21**(3). — 117 – 125. https: //doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-117-125.
4. **Генбач, А. А. Анализ кризиса теплопередачи в капиллярно-пористой системе охлаждения элементов теплоэнергоустановок** / А. А. Генбач, Д. Ю. Бондарцев // Известия высших учебных заведений. — Машиностроение. — 2019. — № 12, с. 21 – 35, doi: 10.18698/0536-1044-2019-12-21-35.
5. **Jamialahmadi, M. Experimental and Theoretical Studies on Subcooled Flow Boiling of Pure Liquids and Multicomponent Mixtures** / M. Jamialahmadi, et al. // Intern. J Heat Mass Transfer. 2008. 51, 2482 – 2493.
6. **Ose, Y. Numerical Study on Subcooled Pool Boiling** / Y. Ose, T. Kunugi // Programme in Nuclear Science and Technology. — 2011. — 2, 125 – 129.
7. **Krepper, E. CFD Modeling Subcooled Boiling-Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design** / E. Krepper, et al. // Nuclear Engineering and Design. — 2007. — 7. — 716 – 731.
8. **Овсянник, А. В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей** / А. В. Овсянник. — Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. — 284 с. ISBN 978-985-535-113-0.
9. **Alekseik, O. S. Physical Model of Boiling on Porous Structure in the Limited Space** / O. S. Alekseik, V. Yu. Kravets // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2013. — 64 4/8, 26 – 31.
10. **Поляев, В. М. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов** / В. М. Поляев, В. А. Майоров, Л. Л. Васильев. — М.: Машиностроение, 1998. — 168 с.
11. **Kovalev, S. A. Evaporation and condensation in heat pipes** / S. A. Kovalev, S. L. Solovev // Science. — 1989, 112 p. (in Russian).
12. **Kupetz, M. Модернизация и продление срока эксплуатации паротурбинных электростанций в Восточной Европе и в России** / M. Kupetz,

E. Jenikejew, F. Hiss // Теплоэнергетика. — 2014. — № 6, С. 35 – 43.
13. **Гринь, Е. А. Возможности механики разрушения применительно к задачам прочности, ресурса и обоснования безопасной эксплуатации тепломеханического энергооборудования** / Е. А. Гринь // Теплоэнергетика. — 2013. — № 1, С. 25 – 32.
14. **Shklover, E. G. Experimental Study of Heat Transfer from Porous Surface in Pool and Forced** / E. G. Shklover // Convection Boiling at Low Pressures. Phase Change Heat Transfer ASME. — 1991. — Vol. 159, p. 75 – 80.
15. **Barthau, G. Active nucleation site density and pool boiling heat transfer** / G. Barthau // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1992. — V. 35, p. 271 – 278.

References

1. **Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Shelginsky A. Ya. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki** (Safety and Reliability of Power Industry), Vol. 12, No. 1, 2019, pp. 29 – 35.
2. **Genbach A. A., Bondartsev D. Yu. Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Mashinostroenie** (Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering), 2019, No. 3, pp. 89 – 106. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-89-106.
3. **Genbach A. A., Bondartsev D. Yu. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI** (Power engineering: research, equipment, technology), 2019, No. 21(3), pp. 117 – 125, [Electronic resource]. — URL: https: //doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-117-125.
4. **Genbach A. A., Bondartsev D. Yu. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie** (BMSTU Journal of Mechanical Engineering), 2019, No. 12, pp. 21 – 35, doi: 10.18698/0536-1044-2019-12-21-35.
5. **Jamialahmadi M. Experimental and Theoretical Studies on Subcooled Flow Boiling of Pure Liquids and Multicomponent Mixtures**, Intern. J Heat Mass Transfer. 2008, No. 51, pp. 2482 – 2493.
6. **Ose Y., Kunugi T. Numerical Study on Subcooled Pool Boiling**, Program in Nuclear Science and Technology, 2011, No. 2, pp. 125 – 129.
7. **Krepper E. CFD Modeling Subcooled Boiling-Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design**, Nuclear Engineering and Design, 2007, No. 7, pp. 716 – 731.
8. **Ovsyannik A. V. Modelirovanie protsessov teploobmena pri kipenii zhidkostei** (Modeling of heat transfer processes during boiling of liquids), Gomel, GSTU named after P. O. Sukhoi, 2012, 284 p., ISBN 978-985-535-113-0.
9. **Alekseik O. S., Kravets V. Yu. Physical Model of Boiling on Porous Structure in the Limited Space, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies**, 2013, No. 64 4/8, pp. 26 – 31.
10. **Polyaev V. M., Mayorov V. A., Vasiliev L. L. Gidrodinamika i teploobmen v poristykh elementakh konstruktsii letatel'nykh apparatov** (Hydrodynamics and heat transfer in the porous structural elements of aircraft), Moscow, Engineering, 1998, 168 p.
11. **Kovalev S. A., Solovev S. L. Evaporation and condensation in heat pipes**, Science, 1989, 112 p. (in Russian).
12. **Kupetz M., Jenikejew E., Hiss F. Teploenergetika** (Teploenergetika), 2014, No. 6, pp. 35 – 43.
13. **Grin E. A. Teploenergetika** (Teploenergetika), 2013, No. 1, pp. 25 – 32.
14. **Shklover E. G. Experimental Study of Heat Transfer from Porous Surface in Pool and Forced**, Convection Boiling at Low Pressures. Phase Change Heat Transfer ASME, 1991, Vol. 159, pp. 75 – 80.
15. **Barthau G. Active nucleation site density and pool boiling heat transfer**, Int. J. Heat Mass Transfer, 1992, Vol. 35, pp. 271 – 278.

d.bondartsev@saem.kz

Modeling of the heat transfer in capillary-porous coatings in power plants

Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Shelginskii A. Ya.

The limit heat fluxes in mesh porous structures are considered in the case study of a rocket-type burner upon water cooling of the combustion chamber and nozzle of the burner. We obtained experimental data and calculated dependences for the boiling crisis and selected the optimal hydraulic pore size of the structure. The influence of the gravitation and capillary potentials in porous structures were analyzed taking into account the critical moisture content. It was shown that the cooling system under consideration provided offtake of the heat fluxes of significantly higher density compared to that in heat pipes. The critical values of the height of the heat exchange surface and the thickness of the porous structure are determined. The results of the theoretical studies are in good agreement with the obtained experimental data.

Keywords: heat transfer crisis; capillary-porous structure; thermal power plants; steam bubble; capillary forces; mass forces; heat transfer control; permeability.

DOI 10.34831/EP.2020.99.92.004

Энергетические проблемы “анклава” и пути их решения

Гашо Е. Г., доктор техн. наук, Бебко Д. А., Кондрахов В. А., инженеры
НИУ “МЭИ”, Москва

Рассмотрены проблемы энергобезопасности, энергонезависимости и энергоэффективности Калининградской области.

Ключевые слова: теплоснабжение, альтернативные и возобновляемые источники энергии, энергобезопасность, энергоэффективность, энергонезависимость.

Калининградская область является единственным анклавом Российской Федерации и имеет статус “стратегически важного региона”. В связи с напряжёнными отношениями со странами Балтии и их решением до 2025 г. отключится от энергокольца БРЭЛЛ актуальными вопросами для энергосистемы области станет вопрос энергонезависимости и энергобезопасности.

Калининградская область расположена на побережье Балтийского моря в северной части Восточной Европы на расстоянии 450 км от границы России. Область является самым западным регионом и отделена от основной части страны территорией иностранных государств. Энергосистема области изолирована от энергосистемы России, однако имеет несколько связующих участков через электрические сети стран Балтии и Белоруссии по восьми высоковольтным линиям электропередачи (рис. 1).

Калининградская область не способна обеспечивать себя топливно-энергетическими ресурсами. На территории области присутствуют следующие полезные ископаемые: нефть, бурый уголь, торф. В целом потенциал всех местных ТЭР составляет не более 30 % от потребностей области. Основным топливом для объектов генерации был выбран газ, поскольку транспортировать его в область было проще всего. Важнейшим путём поставки газа является газопровод Минск — Вильнюс — Каунас — Калининград.

Выход государств Балтии из БРЭЛЛ означает отключение энергетической системы Калининградской области от ЕЭС России. Для повышения надёжности электроснабжения области к 2020 г. предполагалось увеличить генерирующие мощности в 2 раза по сравнению с 2018 г. за счёт строительства четырёх новых электростанций суммарной установленной мощностью 1050 МВт. Для трёх из

Внешние связи системы электроснабжения Калининградской области

Газопровод Минск – Вильнюс – Каунас – Калининград

Рис. 1. Схема расположения важнейших энергетических объектов Калининградской области

них основным топливом является природный газ, а для четвертой — уголь. Данная мера была предназначена для уменьшения влияния поставки транзитного природного газа на генерацию Калининградской области. Но по оценкам властей региона объем потребления электроэнергии к 2035 г. увеличится на треть, что ставит под сомнение целесообразность данных мероприятий, так как вопрос энергобезопасности остаётся актуальным.

Из-за напряжённых политические отношения с Литвой было принято решение в кратчайшие сроки создать альтернативный путь поставки сжиженного природного газа (СПГ) в Калининградскую область морским путём. Для этого построен терминал приема СПГ. Данное решение в определенной мере обезопасило энергетику области, однако в случае полного снабжения через СПГ цена на основной топливный ресурс генерации может вырасти более, чем в 2,5 раза.

Таким образом, основной проблемой региона является возможность автономной работы его ТЭК в условиях сокращённых поставок ТЭР. Один из путей её решения — высвобождение топлива и энергетических мощностей в результате повышения эффективности использования энергоресурсов во всех секторах. Наибольшим потенциалом повышения энергетической эффективности ТЭР в области, на наш взгляд, обладает город Калининград.

Калининград — самый крупный город области, в нём проживает 475 тыс. человек, что составляет 47 % от общего населения региона. Город расположен на берегу Балтийского моря в месте впадения реки Преголи в Калининградский залив. Это один из промышленных центров и крупнейший транспортный узел области, что делает город самым крупным потребителем энергетических ресурсов в регионе. На долю Калининграда приходится более половины всех потребляемых ТЭР области.

В городе расположен крупнейший источник генерации во всём регионе — Калининградская ТЭЦ-2. До недавнего времени она производила более 97 % потребляемой в области электрической энергии. Это одна из самых молодых и технически обеспеченных ТЭЦ. На ней установлены два энергоблока ПГУ-450. ТЭЦ-2 является единственным крупным источником комбинированной выработки в регионе, однако её загрузка по тепловой мощности составляет в среднем не более 15 %. По нашему мнению, именно увеличение эффективности ТЭЦ-2 в тепловом цикле и повышение эффективности теплоснабжения Калининграда обеспечат наибольший потенциал экономии топлива.

Несмотря на мягкую зиму и непродолжительный период стояния отрицательных температур, отопительный период в Калининграде в среднем равен полугоду. Суммарные договорные тепловые нагрузки потребителей городского округа “Город Калининград” (без учета потерь и теплопотребления промышленных предприятий, обеспечиваемого от собственных котельных) составляют 1150,298 Гкал/ч. При этом преобладает централизованное теплоснабжение. В городе действуют несколько крупных теплоснабжающих компаний, деятельность по поставке тепла осуществляют также некоторые предприятия, имеющие свои источники теплоснабжения. Систему централизованного теплоснабжения города характеризует низкий коэффициент использования установленной тепловой мощности (КИУМ = 0,358).

Согласно генеральной схеме теплоснабжения Калининграда наибольшие резервы мощности имеют ТЭЦ-2 — 552,258 Гкал/ч, ТЭЦ-1 — 92,175 Гкал/ч и РТС “Южная” — 73,356 Гкал/ч. Остальные источники имеют значительно меньшие резервы, а на некоторых наблюдается дефицит. Основным топливно-энергетическим ресурсом для выработки тепловой энергии является газ. На нем работают наиболее крупные источники теплоснабжения. Потребление газового топлива этими источниками почти в 19 раз больше, чем потребление угля на угольных источниках.

Именно увязка электрических и тепловых нагрузок на ТЭЦ-2 имеет наибольший потенциал экономии стратегически важного топлива. При максимальной загрузке ТЭЦ-2 в режиме полублоков по теплу и электроэнергии можно сэкономить до 230 тыс. т у.т., что составляет почти 75 % потребления города на выработку тепловой энергии за 2017 г. и целых 7 % от общего потребления первичных энергетических ресурсов региона (рис. 2).

Малая загрузка ТЭЦ-2 по тепловой мощности является не единственной проблемой теплоснабжения Калининграда. Несмотря на то, что централизованное теплоснабжение в Калининграде преобладает над децентрализованным, зон децентрализованного теплоснабжения довольно много. Такие зоны существуют и в центре города, и вблизи источников централизованного теплоснабжения. К тому же в последнее время набирает популярность строительство новых домов с применением индивидуальных источников теплоснабжения. Такая тенденция вызвана недовольством на-

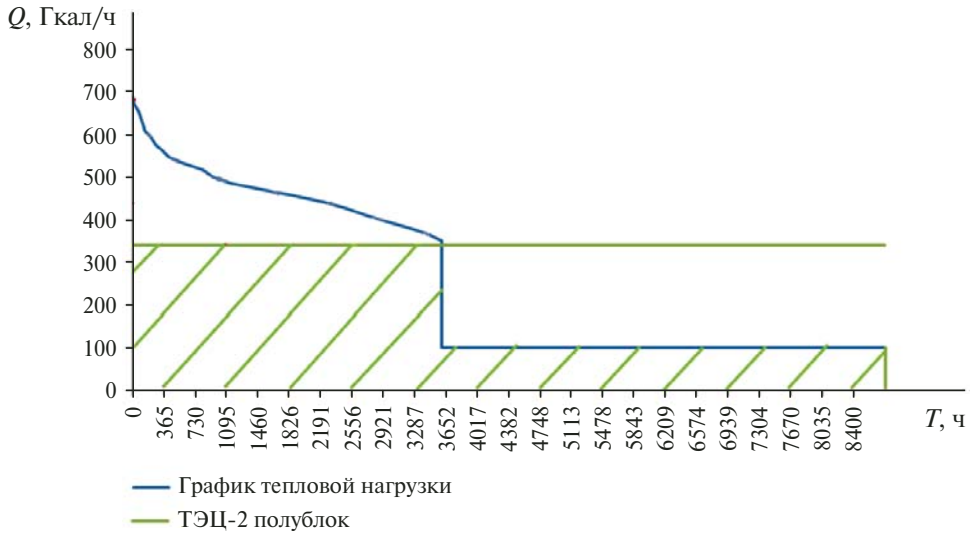


Рис. 2. График продолжительности тепловых нагрузок для города Калининград с выделенной частью, покрываемой ТЭЦ-2 в режиме полублока

селения величиной тарифов на тепловую энергию.

Высокие цены обусловлены не только низким КИУМ, но и состоянием основного энергетического оборудования многих источников. Больше половины всех котельных агрегатов на источниках централизованного теплоснабжения имеют срок службы более 30 лет. У многих источников срок службы оборудования превышает установленный в нормативно-технической документации. Но сейчас состояние тепловых сетей Калининграда улучшается. Доля трубопроводов, проложенных после 2000-го года, составляет более 60 %. Однако перекладка трубопроводов, нуждающихся в замене, идёт медленно. С целью максимальной экономии топлива и улучшения ситуации в сфере теплоснабжения Калининграда нужно в первую очередь создать в системе теплоснабжения условия для максимальной загрузки ТЭЦ-2 и обновить оборудование на прочих источниках теплоснабжения.

Одним из наиболее оптимальных путей экономии топливных ресурсов является использование возобновляемых источников энергии [1 – 6]. Для Калининграда наиболее перспективны два направления использования ВИЭ. Наиболее перспективная стратегия — утилизация твёрдых коммунальных отходов (ТКО) с выработкой энергии. Ежегодно в Калининграде образуется около 196,6 тыс. т ТКО, из которых 70 % (137,6 тыс. т) можно утилизировать. По нашим оценкам, источники энергии, использующие ТКО в качестве энергетического сырья, могут функционировать до 8000 ч в год, что позволит в долгосрочной перспективе увеличить мощности до 10,3 МВт по электричеству и до 24,3 Гкал/ч по теплу. Это обеспечит выработку 82,5 млн кВт · ч электрической и 194,6 тыс. Гкал тепловой энергии, т. е. экономию около 37,9 тыс. т у.т. ежегодно.

Вторым приоритетным направлением для обеспечения надёжного и эффективного теплоснабжения, а также уменьшения зависимости Калининграда от поставок энергетических ресурсов может стать использование низкопотенциальных источников тепловой энергии.

Хранимое в грунте и водоемах тепло можно использовать путем применения систем теплоснабжения на тепловых насосах (ТНУ). Пока ТНУ широкого применения в регионе не получили, но имеют большие перспективы. Основными источниками низкопотенциального тепла в Калининграде являются Калининградский залив и река Преголя, что позволяет использовать ТНУ для покрытия нагрузки в близлежащих зонах действия индивидуального теплоснабжения, а также для замещения неэффективных источников тепловой энергии.

Потенциал возможного использования ТНУ в Калининграде составляет 40 % от общего потенциала использования ТНУ в области. Использование ТНУ в городе позволит экономить до 1,7 тыс. т у.т. в год. Это одно из наименее затратных направлений возобновляемой энергетики в Калининградской области.

Общий эффект от использования данных ВИЭ в Калининграде составит 39,6 тыс. т у.т. или 1,2 % от потребляемых в области ТЭР.

Оценочный потенциал выработки тепловой и электрической энергии объектами возобновляемой энергетики Калининградской области*

Тип НВИЭ	Состояние	Мощность		Выработка энергии		Ежегодная экономия топлива, т у.т.	
		Электрическая, МВт	Тепловая, Гкал/ч	электрической, млн. кВт · ч	тепловой, тыс. Гкал	По электричеству	По теплу
Ветроэнергетика	Действующие	5,1	–	13,5	–	1660	–
	Перспективные	55,1	–	146	–	17 958	–
Малая гидроэнергетика	Действующие	1,6	–	10,8	–	1328	–
	Перспективные	14,1	–	72,4	–	8905	–
Использование ТКО	Действующие	0	0	0	0	0	0
	Перспективные	10,3	24,3	82,5	194,6	10 147	27 828
Использование биогаза	Действующие	0	0	0	0	0	0
	Перспективные	27,8	23,9	129,4	111,1	15 915	15 892
Отходы лесной промышленности	Действующие	0	25,2	0	117,2	0	16 755
	Перспективные	5,6	33,1	26,1	153,9	3210	22 016
Использование торфа	Действующие	0	15,2	0	70,8	0	10 122
	Перспективные	17,6	25	82,1	116,4	10 098	16 641
Использование ТНУ	Действующие	–	3,4	–	12	–	1722
	Перспективные	–	8,6	–	30,1	–	4304
Солнечные панели	Действующие	0,2	–	0,2	–	25	–
	Перспективные	0,6	–	0,65	–	74	–
Солнечные коллекторы	Действующие	–	0,17	–	0,2	–	30
	Перспективные	–	0,5	–	0,62	–	88
ВИЭ региона	Действующие	6,9	43,97	24,5	200,2	3013	28 629
	Перспективные	131,1	115,4	539,15	606,72	66 307	86 769

* Расчеты авторов на основе открытых данных.

Если просуммировать эффекты от повышения эффективности теплоснабжения и использования ВИЭ непосредственно в Калининграде, то можно получить экономию ТЭР в размере 10 % от общего годового потребления области. Высвобождение тепловой мощности в результате использования ВИЭ в городе будет более значительным и может составить ориентировочно 21 – 23 %. Оценка возможного использования других типов ВИЭ в области представлена в таблице.

Активное использование различных возобновляемых энергетических ресурсов и источников энергии региона в среднесрочной перспективе потребует инвестирования около 14,7 млрд. руб. Наиболее высокие затраты на единицу установленной мощности показали следующие направления возобновляемой энергетики Калининградской области: солнечные панели (150 тыс. руб. на 1 кВт) и ветроэнергетика (136 тыс. руб. на 1 кВт), а наименьшие затраты на единицу мощности приходятся на малую гидроэнергетику (40 тыс. руб. на 1 кВт), биоэнергетику (80 тыс. руб. на 1 кВт) и тепловые насосы (100 тыс. руб. на 1 кВт установленной мощности).

Таким образом, перспективными направлениями возобновляемой энергетики, которые обладают максимальным потенциалом на территории Калининградской области, являются: малая гидроэнергетика, биоэнергетика, тепловые насосы, а также ветроэнергетика, которая, несмотря на высокие затраты на единицу установленной мощности, способна обеспечить значительное увеличение выработки электрической энергии в регионе, что позволит существенно улучшить показатели

энергетической безопасности и энергосбережения.

Выводы

Ключевыми направлениями повышения энергетической безопасности региона являются:

повышение энергетической эффективности систем теплоснабжения региона (сокращение потерь в сетях, вывод устаревших небольших котельных);

загрузка наиболее мощного источника комбинированной выработки тепла и электроэнергии — Калининградской ТЭЦ-2;

активное использование различных возобновляемых ресурсов региона (ветра, биомассы, ТКО, геотермального тепла);

повышение эффективности новых конденсационных тепловых электростанций путем перевода их в режим комбинированной выработки тепла и электроэнергии.

Список литературы

1. **Кондрахов, В. А. Повышение эффективности и безопасности энергосистемы Калининградской области за счёт возобновляемых источников энергии.** Диссертация на соискание звания магистра по направлению теплоэнергетика и теплотехника НИУ МЭИ 2019 г.
2. **Бебко, Д. А. Оценка повышения энергетической безопасности Калининградской области при повышении эффективности тепло- и электроснабжения города Калининград.** Диссертация на соискание звания магистра по направлению теплоэнергетика и теплотехника НИУ МЭИ 2019 г.
3. **Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Калининградской области на 2019 – 2023 годы.** URL: http://infrastruktura.gov39.ru/upload/Схема%20и%20программа%20перспективного%20развития%20эл.энергетики%20КО% 202019-2023 гг.pdf.
4. **Возобновляемая энергетика для северо-запада России. Ресурсы и перспективы** URL: http: //baltfriends.ru/book/export/html/59.
5. **Перспективы развития электроэнергетики России на период до 2030 г. Подпрограмма “Модернизация электросетевого комплекса на период до 2020 года”.** URL: https: //ecfor.ru/wp-content/uploads/seminar/energo/z133.pdf.
6. **Безруких, П. П. Оценки ресурсов возобновляемых источников в России**. / П. П. Безруких, В. В. Елистратов, Г. И. Сидоренко. — СПб.: Изд.-во Политех. университета, 2009.

References

1. **Kondrakhov V. A. Povyshenie effektivnosti i bezopasnosti energosistemy Kaliningradskoi oblasti za schet vozobnovlyaemykh istochnikov energii** (Increase in energy efficiency and safety of the energy system of the Kaliningrad region due to renewable energy sources), Thesis for the title of master in the direction of power engineering and heat engineering, MPEI, 2019.
2. **Bebko D. A. Otsenka povysheniya energeticheskoi bezopasnosti Kaliningradskoi oblasti pri povyshenii effektivnosti teplo- i elektrosnabzheniya goroda Kaliningrad** (Evaluation of improving the energy security of the Kaliningrad region while increasing the efficiency of heat and power supply in the city of Kaliningrad), Thesis for the title of master in the direction of power engineering and heat engineering, MPEI, 2019.
3. **Skhema i programma perspektivnogo razvitiya elektroenergetiki Kaliningradskoi oblasti na 2019 – 2023 gody** (Scheme and program for the prospective development of the electric power industry of the Kaliningrad Region for 2019 – 2023), [Electronic resource]. — URL: http://infrastruktura.gov39.ru/upload/Scheme%20and%20program%20forward%20development%20el.energy%20KO%202019-2023gg.pdf.
4. **Vozobnovlyaemaya energetika dlya severo-zapada Rossii. Resursy i perspektivy** (Renewable energy for the north-west of Russia. Resources and Prospects), [Electronic resource]. — URL: http: //baltfriends.ru/book/export/html/59.
5. **Perspektivy razvitiya elektroenergetiki Rossii na period do 2030 g. Podprogramma “Modernizatsiya elektrosetevogo kompleksa na period do 2020 goda”** (Prospects for the development of the electric power industry of Russia for the period until 2030. Subprogram “Modernization of the electric grid complex for the period until 2020”), [Electronic resource]. — URL: https: //ecfor.ru/wp-content/uploads/seminar/energo/z133.pdf.
6. **Bezrukikh P. P., Elistratov V. V., Sidorenko G. I. Otsenki resursov vozobnovlyaemykh istochnikov v Rossii** (Estimates of renewable resources in Russia), St. Petersburg, Publ. of the Polytechnic University, 2009.

GashoYG@mpei.ru

Power industry of the “enclave”: challenges and solutions

Gasho E. G., Bebko D. A., Kondrakhov V. A.

The problems of energy security, energy independence and energy efficiency of the Kaliningrad region are considered. The key goals for improving energy security of the region are revealed, i.e., increase in the energy efficiency of regional heat supply systems (reduction of losses in the networks, withdraw of the obsolete small boiler houses out of service); loading of the most powerful source of combined heat and power generation — Kaliningrad CHPP-2; active use of various renewable resources characteristic of the region; increase in the efficiency of modern condensation thermal power plants by transferring them to the combined heat and power generation mode.

Keywords: heat supply, alternative and renewable energy sources, energy security, energy efficiency, energy independence.

ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

DOI 10.34831/EP.2020.54.44.005

Эффективность применения теплогенераторов на отработанных нефтепродуктах

Кожевников В. А., старший научный сотрудник
ООО "НИИ Транснефть", Москва

Попов С. К., доктор техн. наук, Яковлев И. В., канд. техн. наук
НИУ "МЭИ", Москва

Рассмотрена взаимосвязь теплотехнических и экологических параметров теплогенераторов на отработанных нефтепродуктах. Предложен и определен количественно нормативный коэффициент как мера экологичности работы топливопотребляющей установки. Сформулированы рекомендации по выбору мощности теплогенератора в зависимости от концентрации галогенов в топливе из отработанных нефтепродуктов. Представлена методика оценки энергосберегающего эффекта ряда вариантов использования теплогенераторов на отработанных нефтепродуктах в системе теплоснабжения.

Ключевые слова: отработанные нефтепродукты, теплогенераторы, энергосбережение.

Использование отработанных нефтепродуктов (ОНП) в качестве котельно-печного топлива является перспективным направлением повышения энергоэффективности и энергосбережения в теплоэнергетике. Согласно [1] к ОНП относятся: отработанные масла, промывочные нефтяные жидкости, а также смеси нефти и нефтепродуктов, образующиеся при зачистке средств хранения, транспортирования, извлекаемые из нефтьсодержащих вод.

Для эффективного сжигания ОНП в качестве топлива в соответствии с нормами международной практики [2] целесообразно рассматривать применение специализированных теплогенераторов. Современные теплогенераторы на ОНП производятся в следующих модификациях: котлы водогрейные, парогенераторы, битумогрейные машины, инсинераторы, печи технологические, печи отопительные, воздухонагреватели, водяные калориферы (титаны), воздушные теплопушки, инфракрасные теплопушки, инфракрасные печи, отопительные центры систем вентиляции и кондиционирования и др.

Широкое распространение в России получили отопительное оборудование и горелки на ОНП следующих марок: Тепло-Терм, ГеККон, Тайфун, Тепламос, КЧМ, Олимпия, СибСтронг, Inter Blaze, Citerm, Clean Burn, EnergyLogic, Euronord Ecoheat, Eliminator, STW, Smart Burner, Lanair, Omni, Kroll, SAACKE, Giersch, Thermobile, Lamborghini, Baltur, Master.

Результаты исследований состава и свойств ОНП как топлива и выбросов продуктов сгорания при их сжигании в теплогенераторах изложены во множестве работ зарубежных авторов, например [3 – 10]. Несмотря на положительный опыт применения специализированных теплогенераторов, результаты подобных исследований не дают достаточного представления об энергоэффективности производства тепловой энергии с использованием теплогенераторов на ОНП в схемах теплоснабжения.

В нашей работе анализируется взаимосвязь теплотехнических и экологических параметров теплогенераторов на ОНП, оценивается и сопоставляется энергосберегающий эффект ряда вариантов использования указанных теплогенераторов в системах теплоснабжения.

Теплотехнические и экологические параметры теплогенераторов на ОНП

Большинство специализированных теплогенераторов на ОНП — автономные источники тепловой энергии, позволяющие использовать

в качестве топлива жидкие горючие отходы. Они относятся к установкам малой генерации. Для снижения экологической нагрузки на окружающую среду в ряде стран приняты нормативы на тепловую мощность таких установок. Так, в Великобритании сжигание ОНП в отопительных целях приравнивается к сжиганию отходов (макулатуры, древесины) как топлива для частных и коммерческих потребителей и ограничено правилами [11]: расход не должен превышать 50 кг/ч, единовременное хранение отходов разрешено до 10 т, суммарная мощность теплогенераторов не должна превышать 0,4 МВт. Эти нормы не привязаны к содержанию загрязнителей, в частности — галогенов, и регулируются правилами [12]. Приложением Processed Fuel Oil (PFO) национального стандарта Великобритании [13] с 2017 г. введено ограничение содержания галогенов в топливах из ОНП до 150 ppm, что стало актуальным прежде всего для коммунальных и производственных котельных.

В США согласно части 279 раздела 40 Code of Federal Regulations (CFR) [12] разрешено использование ОНП как топлива с содержанием галогенов до 4000 ppm, но при этом действует ограничение мощности до 500 MBTU/hr (BTU/hr — британская тепловая единица в час) или 146,5 кВт на единицу оборудования. Котлоагрегаты Shenandoah, разработанные для сжигания ОНП и флотских мазутов из расчета на среднегодовое содержание галогенов 327 ppm (при этом допустимый максимум — 1000 ppm), сертифицированы как мазутные и имеют максимальную мощность 6300 MBTU/hr или 1,846 МВт (модель COLUMBIA HRT-6300). Правилами CFR не лимитированы количество установленных теплогенераторов и их суммарная мощность [12, 14].

До принятия единых в Евросоюзе норм в ФРГ действовала группа директив, определяющая правила сжигания ОНП и качественный состав выбросов на основании Директивы 75/439/EWG от 16.07.1975 об обращении отработанных масел [15]. Директивами были рекомендованы ограничения мощности горелочных устройств для сжигания ОНП с учетом концентрации галогенов в топливе. Например, старейшим производителем Германии “Kroll Energy GmbH”, выпускающим производственное оборудование для сжигания ОНП, разработаны горелки на 225, 450, 900 и 1300 кВт под различные сегменты рынка топлива с содержанием галогенов соответственно до 2600, 1300, 650 и 450 ppm.

Уже с 1987 г. приоритетным критерием Директивы 75/439/EWG установлен состав выбросов, привязанный к стандартным нефтяным топливам с содержанием галогенов не более 200 ppm для номинала тепловой мощности 3 МВт [15]. Этот критерий сравнивается в [7, 16] с нормами ASTM (American Society for Testing and Materials — Американское общество по испытанию материалов). После отмены предшествующих директив Евросоюзом принята обобщенная Директива 2010/75/EU о промышленных выбросах [17].

В России расчет промышленных выбросов при сжигании топлива определяется несколькими методиками, в частности [18]. Для жидкого топлива, каковым являются ОНП, годовое количество выбросов вычисляется согласно методике по формуле

$$M = c_{\text{дг}} V_{\text{дг}} B k_1,$$

где M — количество загрязняющего вещества, поступающего в атмосферу с дымовыми газами, т/год; $c_{\text{дг}}$ — массовая концентрация загрязняющего вещества в сухих дымовых газах при коэффициенте расхода воздуха $\alpha = 1{,}4$ и нормальных условиях, мг/м^3; $V_{\text{дг}}$ — удельный объем сухих дымовых газов, образующихся при сгорании топлива с $\alpha = 1{,}4$, м^3/(кг топлива); $B = Q/Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — расчетный расход топлива, (кг топлива)/с; Q — тепловая мощность установки, МВт, $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — низшая теплота сгорания топлива, МДж/(кг топлива); k_1 — коэффициент пересчета для получения выбранной размерности M.

Если загрязняющее вещество в дымовых газах образовалось из-за наличия исходного загрязнителя в топливе (например, галогенов), то годовое количество выбросов пропорционально расходу топлива и концентрации в нем исходного загрязнителя:

$$M = c_{\text{топл}} B k_2 = c_{\text{топл}} Q / Q_{\text{н}}^{\text{р}} k_2,$$

где $c_{\text{топл}}$ — массовая концентрация исходного загрязнителя в топливе, ppm; k_2 — коэффициент пересчета.

Определяющим фактором является значение произведения $c_{\text{топл}} Q$, которое назовем нормативным коэффициентом:

$$K_{\text{норм}} = c_{\text{топл}} Q.$$

Таблица 1

Значения нормативного коэффициента $K_{норм}$

№	Документ, устройство	Номинальная мощность, МВт	Концентрация галогенов в топливе, ppm	$K_{норм}$, ppm · МВт
1	США, CFR [12]	0,1465	4000	586
2	Котел Clean Burn CTB-500	0,1465	4000	586
3	Горелка Kroll KG/UB-225	0,225	2600	585
4	Горелка Kroll KG/UB-450	0,450	1300	585
5	Горелка Kroll KG/UB-900	0,900	650	585
6	Горелка Kroll KG/UB-1300	1,300	450	585
7	Котел Columbia HRT-6300	1,846	327	604
8	ФРГ, Директива 75/439/EWG [15]	3,000	200	600
9	ГОСТ 30735 [19], BSI BS 2869-2017 [13]	4,000	150	600

Таблица 2

К выбору мощности источника теплоснабжения на ОНП

Максимальная концентрация галогенов в топливе из ОНП, ppm	250	500	1000	1500	2000
Максимальная суммарная тепловая мощность источника на ОНП, МВт	2,4	1,2	0,6	0,4	0,3

Нормативный коэффициент $K_{норм}$ можно рассматривать как меру экологичности работы топливопотребляющей установки.

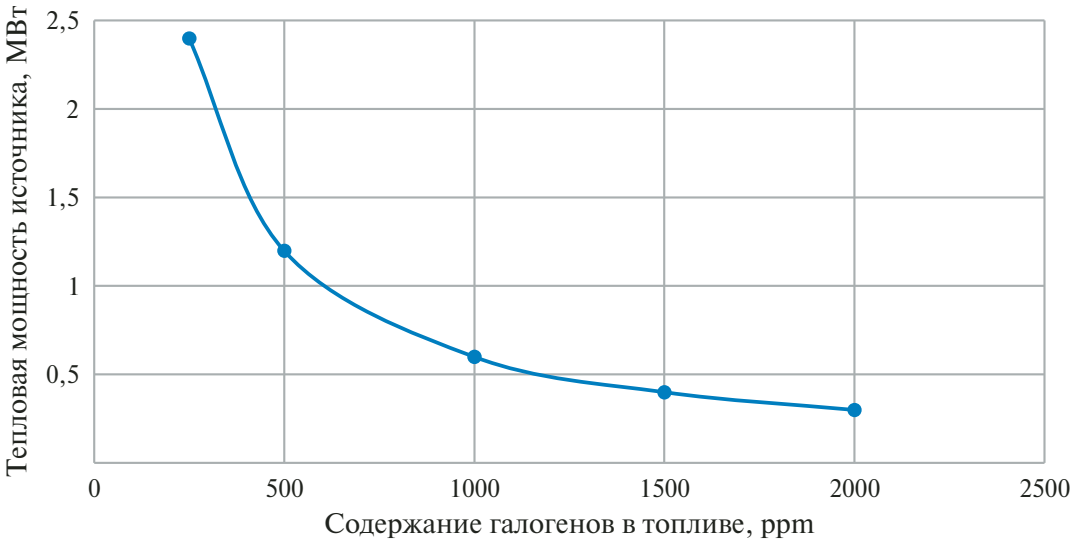
Значения нормативного коэффициента, полученные на основе регламентирующих документов и технических характеристик устройств, работающих на ОНП и иных видах жидкого топлива, приведены в табл. 1.

Из представленных данных следует, что по уровню нормативного коэффициента $K_{норм}$ теплогенераторы и горелки на ОНП близки к котельному оборудованию по ГОСТ 30735 [19] для сжигания обычных нефтяных топлив, которое характеризуется значением $K_{норм} = 600$ ppm · МВт (см. строку 9 в табл. 1). Это значение соответствует эксплуатируемым и перспективным котлоагрегатам на жидком топливе мощностью до 4 МВт [20, 21].

Таким образом, анализ зарубежных и отечественных данных приводит к выводу, что значение нормативного коэффициента $K_{норм} = 600$ ppm · МВт может рассматриваться как мера достаточной экологической эффективности теплогенераторов на ОНП, которую следует использовать при выборе тепловой мощности установки (табл. 2, рисунок). Например, при сжигании ОНП со среднегодовой концентрацией галогенов в пределах от 501 до 1000 ppm разрешенная мощность источника теплоснабжения устанавливается из расчета по максимальной концентрации галогенов: 600 ppm · МВт/1000 ppm = 0,6 МВт.

Согласно терминологии CFR [12] ОНП с концентрацией галогенов до 1000 ppm отходами не считаются и определяются как “used oil”, а ОНП с концентрацией галогенов более 1000 ppm рассматриваются как отходы — “waste oil”.

Большинство автономных воздухонагревателей и водогрейных котлов с распылительными горелками на ОНП имеют тепловые мощности менее 0,3 МВт. Они разработаны для сжигания нефтяных топлив с вероятным содержанием галогенов не более 1000 ppm [4, 6, 10, 14, 22]. Для отопителей с горелками испарительного типа на ОНП верхний предел мощности меньше 100 кВт. В них применимы только “used oil” с содержанием гало-



Зависимость тепловой мощности источника от содержания галогенов в топливе из ОНП

генов не более 500 ppm [3, 4, 5, 10] ввиду относительно низкого положения точки рассеивания отходящих газов (высота дымовых труб порядка 2,5 – 7 м).

По мере повышения качества ОНП путем их очистки и/или смешивания с более чистыми топливами, совершенствования технологий горения и конструкции самих теплогенераторов, ужесточения экологических требований значение нормативного коэффициента должно подлежать пересмотру в сторону уменьшения (см. рисунок).

Оценка энергосберегающего эффекта в системе теплоснабжения

Для оценки энергосберегающего эффекта рассмотрим несколько вариантов использования теплогенераторов на ОНП в системе теплоснабжения.

Вариант 1 (исходный). В рассматриваемую систему входят:

централизованный источник теплоснабжения И, работающий на топливе с теплотой сгорания $Q^{\text{р}}_{\text{н}}$, кДж/кг;

тепловая сеть от источника И до потребителя П;

потребитель, характеризуемый полезным теплопотреблением (полезной тепловой нагрузкой) $Q_{\text{пол}}$, кВт.

Тепловой баланс системы приводится к виду

$$B_1 Q^{\text{р}}_{\text{н}} \eta_{\text{и}} = Q_{\text{пол}}/\eta_{\text{п}} + Q_{\text{пот1}}, \qquad (1)$$

где B_1 — расход топлива в источнике И для обеспечения тепловой нагрузки потребителя, кг/с; $Q_{\text{пот1}}$ — нагрузка теплопотерь в тепловой сети, кВт; $\eta_{\text{и}}$ — КПД централизованного источника теплоснабжения; $\eta_{\text{п}}$ — КПД потребителя.

Вариант 2. В исходную систему вводится теплогенератор на ОНП в месте размещения централизованного источника теплоснабжения при условии сохранения неизменного значения $Q_{\text{пол}}$. В этом случае в рассматриваемой системе теплопотери в сети не изменяются, а уравнение теплового баланса системы приводится к виду

$$B_2 Q^{\text{р}}_{\text{н}} \eta_{\text{и}} + B_{\text{онп}} Q^{\text{р}}_{\text{н онп}} \eta_{\text{онп}} = Q_{\text{пол}}/\eta_{\text{п}} + Q_{\text{пот1}}. \qquad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) следует, что экономия топлива, расходуемого в централизованном источнике, при переходе от варианта 1 к варианту 2 в пересчете на условное топливо составляет:

$$\Delta B_{\text{у.т}} = (B_1 - B_2)\frac{Q^{\text{р}}_{\text{н}}}{Q_{\text{у.т}}} = B_{\text{онп}}\frac{Q^{\text{р}}_{\text{н онп}}}{Q_{\text{у.т}}}\frac{\eta_{\text{онп}}}{\eta_{\text{и}}}, \qquad (3)$$

где $Q_{\text{у.т}} = 29\,300$ кДж/кг — теплота сгорания условного топлива.

Вариант 3. В исходную систему вводится теплогенератор на ОНП в месте размещения потребителя, замещая часть поставок тепловой энергии от централизованного источника. Значение $Q_{\text{пол}}$ неизменно, а теплопотери в сети уменьшаются от $Q_{\text{пот1}}$ до $Q_{\text{пот3}}$. Расход топлива в централизованном источнике снижается до уровня B_3, определяемого из уравнения теплового баланса

$$B_3 Q^{\text{р}}_{\text{н}} \eta_{\text{и}} + B_{\text{онп}} Q^{\text{р}}_{\text{н онп}} \eta_{\text{онп}} = Q_{\text{пол}}/\eta_{\text{п}} + Q_{\text{пот3}}.$$

Экономия топлива, расходуемого в централизованном источнике, при переходе от варианта 1 к варианту 3 в пересчете на условное топливо

$$\Delta B_{\text{у.т}} = (B_1 - B_3)\frac{Q^{\text{р}}_{\text{н}}}{Q_{\text{у.т}}} =$$

$$= B_{\text{онп}} \frac{Q^{\text{р}}_{\text{н онп}}}{Q_{\text{у.т}}} \frac{\eta_{\text{онп}}}{\eta_{\text{и}}} + \frac{Q_{\text{пот1}} - Q_{\text{пот3}}}{Q_{\text{у.т}} \eta_{\text{и}}}. \qquad (4)$$

По сравнению с вариантом 2 переход к варианту 3 дает дополнительную экономию топлива, связанную со снижением теплопотерь в сети.

Вариант 4. В исходную систему вводится теплогенератор на ОНП в месте размещения потребителя, полностью замещая поставки тепловой энергии от централизованного источника. Это возможно, если выполняется условие

$$\frac{Q_{\text{пол}}}{\eta_{\text{п}}} = B_{\text{онп}} Q^{\text{р}}_{\text{н онп}} \eta_{\text{онп}}. \qquad (5)$$

В данном варианте децентрализованного теплоснабжения $Q_{\text{пот4}} = 0$, $B_4 = 0$, а экономия топлива в централизованном источнике при переходе от варианта 1 к варианту 4 составит величину B_1 или в пересчете на условное топливо

$$\Delta B_{\text{у.т}} = B_1 \frac{Q^{\text{р}}_{\text{н}}}{Q_{\text{у.т}}}.$$

Выражая B_1 из формулы (1) и $Q_{\text{пол}}$ из формулы (5), получаем:

$$\Delta B_{\text{у.т}} = B_1 \frac{Q^{\text{р}}_{\text{н}}}{Q_{\text{у.т}}} = \frac{Q_{\text{пот1}}}{Q_{\text{у.т}} \eta_{\text{и}}} + \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{у.т}} \eta_{\text{и}} \eta_{\text{п}}} =$$

$$= \frac{Q_{\text{пот1}}}{Q_{\text{у.т}} \eta_{\text{и}}} + B_{\text{онп}} \frac{Q^{\text{р}}_{\text{н онп}}}{Q_{\text{у.т}}} \frac{\eta_{\text{онп}}}{\eta_{\text{и}}}. \qquad (6)$$

В работе [14] представлены результаты оценки энергетической и экономической эффективности реализованных проектов внедрения водогрейных котлов и воздухонагревателей (вместо водяных и паровых калориферов) на ОНП (отработанном масле), размещенных по варианту 4 — в помещениях потребителей, т. е. по схеме децентрализованного теплоснабжения. Исходными данными для анализа служили данные Росстата за 2005 – 2007 гг. и энергетических обследований систем теплоснабжения, выполненных в рамках Стратегии [23]. Расчеты проводились согласно методике [24]. Некоторые результаты представлены в табл. 3.

В колонке 4 приведено значение экономии топлива в централизованном источнике вследствие ликвидации тепловых потерь в сетях, связывающих источник и потребитель, при переходе на децентрализованное теплоснабжение. Ему соответствует первое слагаемое в правой части уравнения (6).

Данные в колонке 5, являющиеся суммой величин в колонках 3 и 4, характеризуют общую экономию топлива в централизованном источнике при переходе на децентрализованное теплоснабжение по варианту 4. В колонке 6 представлена в процентах доля экономии топлива от ликвидации тепловых потерь системы теплоснабжения в составе общей экономии энергоресурсов. Для рассмотренных 17 объектов этот процент изменяется от 12,51 до 50,82 %, составляя в среднем 32,66 %.

Анализ схем теплоснабжения позволил сопоставить результаты расчетов с фактическими потерями тепловой энергии в СЦТС: в основном потери СЦТС приходятся на тепловые сети. Отсоединение потребителя (децентрализация) приводит к экономии топлива в СЦТС почти пропорционально сумме тепловых нагрузок потребителя и отключенного участка тепловой сети. В результате можно заключить, что размещение автономных теплогенераторов на ОНП целесообразно выполнять вблизи или непосредственно у потребителя, что приводит к существенной экономии топлива в СЦТС.

Учитывая опыт энергетических обследований, разработки схем теплоснабжения и топливообеспечения [14, 22, 23, 25, 26], рассмотренный вариант 4 энергосбережения является актуальным для предприятий, на балансе которых имеются тепловые сети с потерями теплоты, превышающими затраты теплоты на собственные нужды автономных теплогенераторов, и/или с централизованными калориферными установками отопления, а также при необходимости локального обеспечения и контроля температур в рабочей зоне при наличии альтернативного топлива в виде ОНП.

Выводы

1. Анализ зарубежных и отечественных данных по теплотехническим и экологическим параметрам теплогенераторов на жид-

Таблица 3

Экономия топлива в системах централизованного теплоснабжения (СЦТС)

№	Место размещения объекта	Годовой расход ОНП на объекте внедрения $B_{онп}$, т у.т/год	Суммарные годовые тепловые потери в сетях СЦТС в пересчете на условное топливо $B_{пот}$, т у.т/год	Годовая экономия топлива в СЦТС ΔB, т у.т/год	Процент потерь в экономии топлива $100\frac{B_{пот}}{\Delta B}$, %
1	2	3	4	5	6
1	Москва и Московская область	101,60	14,53	116,13	12,51
2		78,25	11,19	89,44	12,51
3		92,45	13,22	105,67	12,51
4	Санкт-Петербург	66,17	14,43	80,60	17,90
5	Новосибирск	69,18	15,08	84,26	17,90
6	Сахалин	388,76	401,78	790,54	50,82
7	Краснодар	134,45	37,27	171,72	21,71
8	Екатеринбург	198,04	54,17	252,21	21,48
9	Сыктывкар	293,56	198,69	492,25	40,36
10	Томск	283,93	109,88	393,81	27,90
11	Тольятти	199,73	57,60	257,33	22,38
12	Кемерово	99,45	39,74	139,19	28,55
13	Чита	145,58	70,19	215,77	32,53
14	Сургут	231,90	119,43	351,33	33,99
15	Ставрополь	61,43	26,24	87,67	29,93
16	Магадан	123,99	79,70	203,69	39,13
17	Самара	87,40	25,21	112,60	22,38
ИТОГО		2655,85	1288,36	3944,21	32,66

ком топливе и отработанных нефтепродуктах приводит к выводу, что произведение концентрации исходного загрязнителя (галогенов) в топливе на тепловую мощность установки (названное нормативным коэффициентом $K_{норм}$) является мерой экологичности ее работы. Для современных теплогенераторов на отработанных нефтепродуктах характерно значение $K_{норм} = 600$ ppm · МВт.

2. Основываясь на значении $K_{норм} = 600$ ppm · МВт, сформулированы рекомендации по выбору мощности теплогенератора в зависимости от концентрации галогенов в топливе из отработанных нефтепродуктов. По мере совершенствования технологии очистки и сжигания отработанных нефтепродуктов, разработки более эффективных теплогенераторов значение нормативного коэффициента должно подлежать пересмотру в сторону его уменьшения, что будет отражать рост экологичности теплогенератора.

3. Разработана методика оценки энергосберегающего эффекта использования теплогенераторов на отработанных нефтепродуктах в системе теплоснабжения. На основе данных энергетических обследований показано, что размещение таких теплогенераторов вблизи или непосредственно у потребителя может обеспечить значительную экономию топлива за счет децентрализации источников теплоснабжения и сокращения потерь теплосетей. Применение автономных теплогенераторов на

отработанных нефтепродуктах одновременно с существующими системами теплоснабжения может повысить надежность этих систем и независимость от внешних источников энергии.

Список литературы

1. **ГОСТ 26098–84 “Нефтепродукты. Термины и определения”**.
2. **Кожевников, В. А. Энергоэффективное использование отработанных нефтепродуктов как топлива** / В. А. Кожевников, С. К. Попов // Вестник МЭИ. 2020. — № 2. — С. 42 – 51. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-42-51.
3. **Hall, Robert E. Comparison of Air Pollutant Emissions from Vaporizing and Air Atomizing Waste Oil Heaters** / Robert E. Hall, W. Marcus Cooke & Rachael L. Barbour. 1983. — https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00022470.1983.10465627.
4. **Vermont used oil analysis and waste oil furnace emissions study.** Vermont Agency of Natural Resources, U.S. EPA. 1996. — https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/w_oilacr.pdf.
5. **Assessment of the effects of combustion of waste, oil and health effects associated with the use of waste oil as a dust suppressant.** Ministry for the Environment New Zealand // Woodward-Clyde. 2000. — https://www.mfe.govt.nz/sites/default/files/used-oil-dust-suppressant-aug00.pdf.
6. **McDonald, R. Evaluation of Gas, Oil and Wood Pellet Fueled Residential Heating System Emissions Characteristics.** Brookhaven National laboratory / R. McDonald // Energy Sciences and Technology Department Energy Resources Division. 2009. — https://www.bnl.gov/isd/documents/71376.pdf.
7. **Energy Management by Recycling of Vehicle Waste Oil in Pakistan.** International Journal of Scientific Engineering and Technology. 2013. — http://www.ijset.com/publication/v2/173.pdf.
8. **Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Industrial** // Commercial, and Institutional Boilers. 2010. — https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/iciboilers.pdf.
9. **Tawil, E. Boiler Fuels, Emissions and Efficiency** / E. Tawil — https://www.cedengineering.com/userfiles/Boiler%20Fuels,%20Emissions%20and%20Efficiency.pdf.
10. **Раздел AP-42 архива EPA США “Air Emissions Factors and Quantification”**. — https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/index.html, мазуты: https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/bgdocs/b01s03.pdf, https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/final/c01s03.pdf, отработанные нефтепродукты: https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/bgdocs/b01s11.pdf, https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/final/c01s11.pdf.
11. **Guidance. U4 waste exemption: burning waste as fuel in a small appliance. United Kingdom** — https://www.gov.uk/guidance/waste-exemption-u4-burning-of-waste-as-a-fuel-in-a-small-appliance.
12. **Title 40 CFR part 279. Standards for the Management of Used Oil.** — https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=a6739eadc899514c81d8e3781bb37e7e&mc=true&node=pt40.29.279&rgn=div5.
13. **BSI BS 2869-2017 Specification Fuel oils for agricultural, domestic and industrial engines and boilers. Processed Fuel Oil (PFO) End of waste criteria for the production and use of processed fuel oil from waste lubricating oils**. — https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/296420/geho0211btmo-e-e.pdf.
14. **Кожевников, В. А. Анализ потенциала использования отработанных масел для нужд теплоснабжения** / В. А. Кожевников, С. В. Захаров. 2008. — http://www.energosovet.ru/stat423.html.
15. **Directive 75/439/EWG on Waste Oils**. 1991 — https://ec.europa.eu/environment/waste/studies/waste oil.htm, https: //ec.europa.eu/environment/archives/waste/oil/questionnaire.htm, https://ec.europa.eu/environment/waste/studies/oil/waste oil.pdf, https://ab.gov.tr/files/tarama/tarama_files/27/SC27EXP HW,%20Oils%20and%20PCB.pdf, https://www.fuelseurope.eu/wp-content/uploads/2017/05/positionpaperonwasteoils-approved-2003-02283-01-e.pdf.
16. **Pelitli, V. Waste oil management: Analyses of waste oils from vehicle crankcases and gearboxes** / V. Pelitli, Ö. Doğan, H. J. Köroğlu — Global J. Environ. Turkey. 2017. — https://www.gjesm.net/article_22148_03e030d8c64c45fd18a362bc6f9d017c.pdf.
17. **Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control)** — https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj.
18. **Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час.** 1999. — http://docs.cntd.ru/document/1200031340.
19. **ГОСТ 30735–2001 “Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4,0 МВт. Общие технические условия”**.
20. **Кожевников, В. А. Моделирование процесса горения нефти с подмесом подтоварной воды в жаротрубных котлах** / В. А. Кожевников, Ю. В. Проскурин, П. В. Росляков // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2017. № 2. — С. 94 – 101.
21. **Ревель-Муроз, П. А. Разработка энергоэффективного водогрейного котла для блочно-модульной котельной ПАО “Транснефть”** / П. А. Ревель-Муроз, А. Ф. Копысов, П. В. Росляков, И. Л. Ионкин, Б. Г. Гриша, Ю. В. Проскурин, М. Н. Ильина // Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2018. — Т. 8. — № 2. — С. 180 – 187.
22. **Николаева, А. В. Анализ потенциала использования отработанных нефтепродуктов на собственные нужды в организациях системы “Транснефть”** / А. В. Николаева, В. А. Кожевников, В. А. Черных // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2020. — Т. 10. — № 1. — С. 70 – 83.
23. **Стратегия повышения энергоэффективности в муниципальных образованиях.** 2008. — http://www.energosovet.ru/stenergo.php.
24. **Приказ Министерства промышленности и энергетики РФ “Об организации в Министерстве промышленности и энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов удельных расходов топлива на отпущенную электрическую и тепловую энергию от тепловых электростанций и ко-**

тельных" от 04.10.2005 № 268. — http://docs.cntd.ru/document/901951153.
25. **Кожевников, В. А. О некоторых итогах энергетических обследований** / В. А. Кожевников, В. М. Нагдасёв, К. В. Александров. 2007. — http://www.rosteplo.ru/Tech stat/stat_shablon.php?id=3707.
26. **Кожевников В. А. Энергоаудит систем теплоснабжения. О некоторых аспектах**. 2009. — http://www.rosteplo.ru/Tech stat/stat_shablon.php?id=2120.

References

1. **GOST 26098–84 "Nefteprodukty. Terminy i opredeleniya"** (State Standard 26098–84 "Petroleum products. Terms and definitions").
2. **Kozhevnikov V. A., Popov S. K. Vestnik MEI** (Vestnik MPEI), 2020, No. 2, pp. 42 – 51, DOI:10.24160/1993-6982-2020-2-42-51.
3. **Robert E. Hall, Marcus W. Cooke, Rachael L. Barbour. Comparison of Air Pollutant Emissions from Vaporizing and Air Atomizing Waste Oil Heaters**, 1983, [Electronic resource]. — URL: https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00022470.1983.10465627.
4. **Vermont used oil analysis and waste oil furnace emissions study**. Vermont Agency of Natural Resources, U.S. EPA, 1996, [Electronic resource]. — URL: https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/w_oilacr.pdf.
5. **Assessment of the effects of combustion of waste, oil and health effects associated with the use of waste oil as a dust suppressant**. Ministry for the Environment New Zealand, Woodward-Clyde, 2000, [Electronic resource]. — URL: https://www.mfe.govt.nz/sites/default/files/used-oil-dust-suppressant-aug00.pdf.
6. **McDonald R. Evaluation of Gas, Oil and Wood Pellet Fueled Residential Heating System Emissions Characteristics**. Brookhaven National Laboratory, Energy Sciences and Technology Department Energy Resources Division, 2009, [Electronic resource]. — URL: https://www.bnl.gov/isd/documents/71376.pdf.
7. **Energy Management by Recycling of Vehicle Waste Oil in Pakistan**, International Journal of Scientific Engineering and Technology, 2013, [Electronic resource]. — URL: http://www.ijset.com/publication/v2/173.pdf.
8. **Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Industrial, Commercial and Institutional Boilers**, 2010, [Electronic resource]. — URL: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/iciboilers.pdf.
9. **Tawil E. Boiler Fuels, Emissions and Efficiency**, [Electronic resource]. — URL: https://www.cedengineering.com/userfiles/Boiler%20Fuels,%20Emissions%20and%20Efficiency.pdf.
10. **Razdel AR-42 arkhiva ERA SShA "Air Emissions Factors and Quantification"**, mazuty, otrabotannye nefteprodukty (Section AP-42 of the US EPA archive "Air Emissions Factors and Quantification", fuel oils, used oil products), [Electronic resource]. — URL: https: //www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/index.html, https: //www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/bgdocs/b01s03.pdf, https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/final/c01s03.pdf, https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/bgdocs/b01s11.pdf, https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/final/c01s11.pdf.
11. **Guidance. U4 waste exemption: burning waste as fuel in a small appliance. United Kingdom**, [Electronic resource]. — URL: https://www.gov.uk/guidance/waste-exemption-u4-burning-of-waste-as-a-fuel-in-a-small-applianwa.
12. **Title 40 CFR part 279. Standards for the Management of Used Oil**, [Electronic resource]. — URL: https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=a6739eadc899514c81d8e3781bb37e7e&mc=true&node=pt40.29.279&rgn=div5.
13. **BSI BS 2869-2017 Specification Fuel oils for agricultural, domestic and industrial engines and boilers. Processed Fuel Oil (PFO) End of waste criteria for the production and use of processed fuel oil from waste lubricating oils**, [Electronic resource]. — URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment data/file/296420/geho0211btmo-e-e.pdf.
14. **Kozhevnikov V. A., Zakharov S. V. Analiz potentsiala ispol'zovaniya otrabotannykh masel dlya nuzhd teplosnabzheniya** (Analysis of the potential use of waste oils for heat supply), 2008, [Electronic resource]. — URL: http://www.energosovet.ru/stat423.html.
15. **Directive 75/439/EWG on Waste Oils**, 1991, [Electronic resource]. — URL: https://ec.europa.eu/environment/waste/studies/waste oil.htm, https: //ec.europa.eu/environment/archives/waste/oil/questionnaire.htm, https://ec.europa.eu/environment/waste/studies/oil/waste_oil.pdf, https://ab.gov.tr/files/tarama/tarama_files/27/SC27EXP HW,%20Oils%20and%20PCB.pdf, https: //www.fuelseurope.eu/wp-content/uploads/2017/05/positionnpaperonwasteoils-approved-2003-02283-01-e.pdf.
16. **Pelitli V., Doğan Ö., Köroğlu H. J. Waste oil management: Analyses of waste oils from vehicle crankcases and gearboxes**, Global J. Environ, Turkey, 2017, [Electronic resource]. — URL: https://www.gjesm.net/article_2214803e030d8c64c45fd18a362bc6f9d017c.pdf.
17. **Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of November 24, 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control)**, [Electronic resource]. — URL: https: //eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj.
18. **Metodika opredeleniya vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu pri szhiganii topliva v kotlakh proizvoditel'nost'yu menee 30 tonn para v chas ili menee 20 Gkal v chas** (The methodology for determining emissions of pollutants into the atmosphere when burning fuel in boilers with a capacity of less than 30 tons of steam per hour or less than 20 Gcal per hour), 1999, [Electronic resource]. — URL: http://docs.cntd.ru/document/1200031340.
19. **GOST 30735–2001 "Kotly otopitel'nye vodogreinye teploproizvoditel'nost'yu ot 0,1 do 4,0 MVt. Obshchie tekhnicheskie usloviya"** (State Standard 30735–2001 "Heating hot-water boilers with capacity from 0,1 to 4,0 MW. General specifications").
20. **Kozhevnikov V. A., Proskurin Yu. V., Roslyakov P. V. Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov** (Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation), 2017, No. 2, pp. 94 – 101.
21. **Revel-Muroz P. A., Kopysov A. F., Roslyakov P. V., Ionkin I. L., Grisha B. G., Proskurin Yu. V., Ilyina M. N. Razrabotka energoeffektivnogo vodogreinogo kotla dlya blochno-modul'noi kotel'noi PAO "Transneft'"** (Development of an energy-efficient hot water boiler

for the block-modular boiler house of PAO "Transneft"), Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation, 2018, Vol. 8, No. 2.
22. **Nikolaeva A. V., Kozhevnikov V. A., Chernykh V. A. Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov** (Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation), 2020, Vol. 10, No. 1, pp. 70 – 83.
23. **Strategiya povysheniya energoeffektivnosti v munitsipal'nykh obrazovaniyak** (Strategy for improving energy efficiency in municipalities), 2008, [Electronic resource]. — URL: http://www.energosovet.ru/stenergo.php.
24. **Prikaz Ministerstva promyshlennosti i energetiki RF "Ob organizatsii v Ministerstve promyshlennosti i energetiki Rossiiskoi Federatsii raboty po utverzhdeniyu normativov udel'nykh raskhodov topliva na otpushchennuyu elektricheskuyu i teplovuyu energiyu ot teplovykh elektrostantsii i kotel'nykh" ot 04.10.2005 № 268** (Order of the Ministry of Industry and Energy of the Russian Federation "On the organization in the Ministry of Industry and Energy of the Russian Federation of work to approve standards for specific fuel consumption for supplied electric and thermal energy from thermal power plants and boiler houses" dated 04.10.2005, No. 268), [Electronic resource]. — URL: http://docs.cntd.ru/document/901951153.
25. **Kozhevnikov V. A., Nagdasev V. M., Alexandrov K. V. O nekotorykh itogakh energeticheskikh obsledovanii** (About some results of energy surveys), 2007, [Electronic resource]. — URL: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3707.
26. **Kozhevnikov V. A. Energoaudit sistem teplosnabzheniya. O nekotorykh aspektakh** (Energy audit of heat supply systems. About some aspects), 2009, [Electronic resource]. — URL: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2120.

PopovSK@mpei.ru

The efficiency of using heat generators operating on waste oil products

Kozhevnikov V. A., Popov S. K., Yakovlev I. V.

The relationship between heat engineering and environmental parameters of heat generators operating on spent petroleum products is considered. A rated coefficient is proposed and quantified as a measure of the environmental friendliness of a fuel-consuming installation. Recommendations on the choice of heat generator capacity are formulated, depending on the concentration of halogens in the fuel obtained from spent petroleum products. A methodology for assessing the energy-saving effect of various options of using heat generators operating on waste petroleum products in the heat supply system is presented.

Keywords: waste oil products, heat generators, energy saving.

DOI 10.34831/EP.2020.55.59.006

Особенности применения низкопотенциального пара в системах теплоснабжения

Хромченков В. Г., канд. техн. наук, Мурашов Л. М., Жигулина Е. В., инженеры, Яворовский Ю. В., канд. техн. наук
НИУ "МЭИ", Москва

Представлен способ повышения энергетической эффективности промышленных предприятий за счет компримирования низкопотенциального пара, тепловая энергия которого не используется из-за его низких параметров. Проанализированы затраты энергии на процесс повышения давления пара, включая затраты электрической энергии. Разработана и представлена методика для определения экономии теплоты топлива в случае замещения свежего пара компримированным паром, вырабатываемым в котельной предприятия, а также из отборов паровых турбин ТЭЦ.

Ключевые слова: энергоэффективность, внутренние энергетические ресурсы, низкопотенциальный пар, компрессор, теплоэлектроцентраль, промышленное предприятие.

При решении разного рода задач по повышению энергоэффективности предприятия или отрасли в целом зачастую затрагивается тема рационального использования различных источников энергии. Одним из таких источников является пар, получаемый в результате работы технологического и энергетического оборудования, в том числе при использовании систем испарительного охлаждения. Часто это низкопотенциальный пар с давлением от 0,1 до 0,3 МПа, относящийся к группе ВЭР (внутренних энергетических ресурсов), который имеет ограниченное применение в связи со сравнительно небольшими значениями температуры и давления [1].

На большинстве заводов его почти полностью сбрасывают в атмосферу из-за отсутствия потребителей и трудностей транспортировки. В лучшем случае пар захолаживается с получением конденсата для экономии химочищенной воды [2]. Повысить эффективность использования пара низкого давления можно посредством его механической компрессии (МКП) [3].

После сжатия в компрессоре пар можно использовать как для подачи в трубопроводы системы пароснабжения предприятия, так и в локальных установках и системах. При наличии сторонних потребителей возможно отпускать пар им [4].

На многих заводах выработка пара низкого давления составляет многие десятки тонн в час. Например, система испарительного охлаждения (СИО) мартеновских печей Череповецкого металлургического комбината в течение всего срока их эксплуатации выдавала 50 – 60 т/ч пара с давлением 0,2 – 0,3 МПа, который не использовался по указанным выше причинам. Между тем, вполне целесообразным может быть повышение давления пара при помощи турбокомпрессоров до давления, необходимого потребителям [5].

Процесс механической компрессии пара представляет собой разомкнутый цикл, действующий по принципу теплового насоса (при затратах электрической энергии на сжатие пара появляется возможность потреблять тепловую энергию). Пар низкого давления, образовавшийся в результате технологических процессов (например, работы котлов-испарителей или варочных камер) подвергается сжатию и затем в процессе конденсации отдает тепло потребителю при более высокой температуре, заменяя свежий пар или высокопотенциальную энергию в другой форме (см. рисунок) [6].

Экономия тепловой энергии в пересчете на первичное топливо, которую дает исполь-

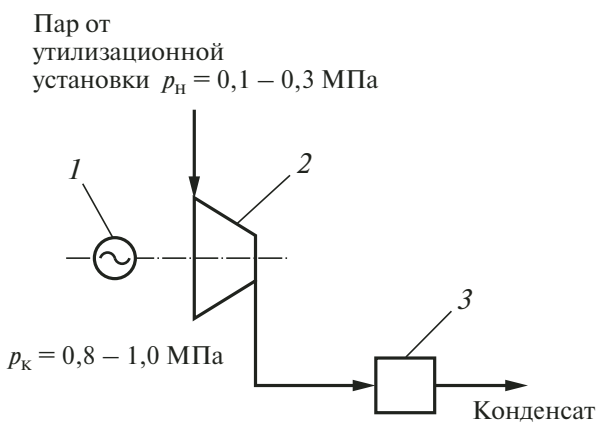


Схема процесса МКП: *1* — электродвигатель: *2* — компрессор; *3* — потребитель

зование ВЭР в виде пара и горячей воды, определяется по формуле

$$Q_{эк}^{топ} = Q_{ВЭР}^{исп} / \eta_{кот}, \quad (1)$$

где $Q_{ВЭР}^{исп}$ — количество использованной теплоты ВЭР, ГДж; $\eta_{кот}$ — КПД замещаемой котельной.

Эта формула может использоваться как для расчета экономии тепловой энергии в пересчете на первичное топливо (ГДж), так и для расчета экономии топлива в единицу времени (ГДж/ч).

Если в системе теплоснабжения завода имеется ТЭЦ, то при расчетах экономии топлива надо различать два случая:

существует ТЭЦ (заводская или районная), которая при оптимальном коэффициенте теплофикации $\alpha_{ТЭЦ}$ покрывает все тепловые нагрузки завода, а рост нагрузок в течение ближайших 5 – 8 лет не предвидится;

завод строится или расширяется (реконструируется), соответственно появляются или возрастают тепловые нагрузки, которые должны быть покрыты за счет ВЭР или строительства (расширения) ТЭЦ. Одновременно возрастают и ресурсы ВЭР.

В первом случае покрытие части тепловых нагрузок за счет ВЭР уменьшает расход отборного пара турбин ТЭЦ, а следовательно, и комбинированную выработку теплоты и электроэнергии этими турбинами по сравнению с тем периодом времени, когда ВЭР не используются. Поэтому при определении размера годовой экономии топлива на заводе надо учитывать влияние использования ВЭР на уменьшение экономии топлива, поставляемого на ТЭЦ.

Во втором случае в холодное время года, когда отборы турбин загружены полностью и в работу начинают включаться пиковые котлы, использование ВЭР вытесняет пиковые котлы на топливе, а не отборы турбин. В этот период года экономия тепловой энергии, ГДж, в пересчете на первичное топливо по заводу определяется по формуле

$$Q_{эк} = Q^{п.к} / \eta_{кот}^{п.к}, \quad (2)$$

где $Q^{п.к}$ — теплота ВЭР, заместивших теплоту пиковых котлов, ГДж; $\eta_{кот}^{п.к}$ — КПД пиковых котлов.

В теплое время года, когда пиковые котлы не работают, может наблюдаться вытеснение отборов турбин и соответствующее уменьшение комбинированной выработки электроэнергии на ТЭЦ. Соответственно экономию тепловой энергии, ГДж, в пересчете на первичное топливо на ТЭЦ надо определять по формуле

$$Q_{эк}^{топ} = \xi \frac{\Delta Q_{отб}}{\eta_{кот}^{ТЭЦ} \eta_{т.п}}, \quad (3)$$

где ξ — коэффициент ценности теплоты пара в отборе турбины; $\Delta Q_{отб}$ — уменьшение количества теплоты, отпускаемой из отборов турбин; $\eta_{кот}^{ТЭЦ}$ — КПД котельной ТЭЦ; $\eta_{т.п} = 0{,}98 \div 0{,}99$ — КПД теплового потока (характеризует значение потерь тепловой энергии при транспортировке пара от парового котла до турбины).

Коэффициент ценности теплоты ξ для данного отбора с достаточной точностью может быть определен по формуле [4]

$$\xi = y\,[1 + k\,(1 - y)], \quad (4)$$

где k — коэффициент, зависящий от начальных параметров пара, состава и особенностей тепловой схемы турбины; y — коэффициент недовыработки мощности отборным паром турбины:

$$y = \frac{h_{отб} - h_к}{h_0 - h_к}. \quad (5)$$

Здесь $h_{отб}$, $h_к$ и h_0 — соответственно энтальпии пара в отборе турбины, пара, поступающего в конденсатор, и пара на входе в турбину, кДж/кг.

В качестве примера рассмотрим замещение отборов турбин тепловыми ВЭР. При этом $Q_{ВЭР} = \Delta Q_{отб}$, а $\Delta Q_{тур} = \xi Q_{ВЭР}$, причем условие $\xi > 0$ выполняется всегда, даже при самых низких давлениях пара в отборах, а значение $\Delta Q_{тур}$, ГДж, всегда положительное, т. е. при использовании ВЭР всегда достигается экономия топлива по заводу, даже когда пар, полученный за счет ВЭР, имеет низкое давление.

Удельная работа компрессора на компримирование 1 кг пара, кДж/кг, равная приращению энтальпии пара $\Delta h_к$, вычисляется по формуле [7]

$$\Delta h_к = \Delta h_к^{из} / \eta_{из}, \quad (6)$$

где $\Delta h_к^{из}$ — повышение энтальпии в изоэнтропном (идеальном) процессе сжатия, определяемое по h, s-диаграмме для водяного пара, кДж/кг; $\eta_{из} = 0{,}80 \div 0{,}86$ — изоэнтропный внутренний КПД турбокомпрессора (ТК).

Для определения расхода электроэнергии на привод ТК надо учесть его электромеханический КПД $\eta_{эм} = 0{,}95 \div 0{,}98$. Соответственно удельный расход электроэнергии в ТК на 1 кг пара, кВт · ч/кг, [8]:

$$э^{уд}_{т.к} = \Delta h_к / (3600\eta_{эм}). \quad (7)$$

Полный удельный расход тепловой энергии, кДж/кг, в пересчете на первичное топливо на повышение давления пара определяется по формуле

$$q_{топ} = \Delta h^{из}_к \frac{q_{кэс}}{\eta_{из}\eta_{эм}}, \quad (8, а)$$

где $q_{кэс}$ — удельный расход тепловой энергии в пересчете на первичное топливо на единицу отпущенной электроэнергии в энергосистеме (безразмерная величина).

Если же $q_{кэс}$ имеет размерность кДж/(кВт · ч), то необходимо использовать следующую формулу:

$$q_{топ} = \Delta h^{из}_к \frac{q_{кэс}}{3600\eta_{иэ}\eta_{эм}}. \quad (8, б)$$

Удельная экономия теплоты топлива, кДж/кг, определяется из выражения

$$q_{эк1} = (q_{пот}/\eta_{кот}) - q_{топ}, \quad (9)$$

где $q_{пот}$ — теплота, полученная потребителем [9].

Экономия топлива, кг/с, при компримировании пара может быть определена следующим образом:

$$B_{эк} = D\frac{q_{эк1}}{3{,}6Q^р_н}, \quad (10)$$

где $Q^р_н$ — низшая теплота сгорания натурального или условного топлива, кДж/кг; D — расход компримированного пара, т/ч.

В качестве примера рассмотрим следующий случай: насыщенный пар с параметрами $p_{вк} = 0{,}2$ МПа надо сжать до $p_{нк} = 1{,}0$ МПа. Степень сжатия соответственно равна $\varepsilon_к = 1/0{,}2 = 5$. Определим достигаемую экономию топлива.

По h, s-диаграмме для воды и водяного пара находим $\Delta h^{иэ}_к = 346{,}9$ кДж/кг. Значение $q_{топ}$ — полного удельного расхода теплоты топлива на повышение давления пара, кДж/кг, определяем по формуле (11):

$$q_{топ} = \Delta h^{из}_к \frac{q_{кэс}}{\eta_{иэ}\eta_{эм}} = 346{,}9\frac{2{,}9}{0{,}85\cdot 0{,}97} = 1208. \quad (11)$$

По h, s-диаграмме находим с учетом $\eta_{иэ} = 0{,}85$ температуру пара в конце сжатия $t_{нк} = 329$ °С. Энтальпия пара при $p_{нк} = 1{,}0$ МПа и $t_{нк} = 329$ °С по h-s-диаграмме $h_{нк} = 3115$ кДж/кг. Энтальпия конденсата пара при давлении 1,0 МПа равна $h_к = 762$ кДж/кг, а при давлении 0,1 МПа $h_к = 417$ кДж/кг.

Если у потребителя конденсат отводится с температурой насыщения, то потребитель получит теплоту $q_{пот} = 3115 - 762 = 2353$ кДж/кг, а в случае использования теплоты конденсата примерно до 100 °С – $q_{пот} = 3115 - 417 = 2698$ кДж/кг. Следовательно, экономия теплоты топлива для системы “промпредприятие — электростанция” при КПД замещаемой котельной $\eta_{кот} = 0{,}85$ составит:

для первого случая:

$$q_{эк1} = (q_{пот}/\eta_{кот}) - q_{топ} = 2353/0{,}85 - 1208 = 1560 \text{ кДж/кг пара}; \quad (12)$$

для второго случая:

$$q_{эк2} = 2698/0{,}85 - 1208 = 1966 \text{ кДж/кг}. \quad (13)$$

Данный расчет справедлив, если пар давлением 0,2 МПа на предприятии не может быть использован и сбрасывается.

Итак, в зависимости от температуры конденсата потребитель получает теплоту от пара в несколько раз больше, чем затрачивается теплота топлива на КЭС. Так, для представленного примера при $q_{пот} = 2698$ кДж/кг это составит 2698/1208 = 2,23 раза. Аналогичные соотношения наблюдаются при работе тепловых насосов.

При сравнительной оценке вариантов надо учитывать и экологический эффект при использовании пара низкого давления путем его компримирования, так как при этом уменьшается количество топлива, потребляемого на заводских энергоустановках. Кроме того, на электростанциях, работающих в энергосистеме, во многих случаях может быть использовано низкосортное топливо [10].

Таким образом, можно говорить о том, что использование низкопотенциального пара в системах теплоснабжения является относительно простым, доступным, а главное, эффективным средством, связанным с экономией топливно-энергетических ресурсов на промышленном предприятии.

Список литературы

1. **Ротач, В. Я. Теория автоматического управления:** учебник для вузов / В. Я. Ротач — М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

2. **Жигулина, Е. В. Характеристики технологических энергоносителей и энергосистем промышленных предприятий:** учеб. пособ. для вузов / Е. В. Жигулина, Н. В. Калинин, Ю. В. Яворовский, Л. М. Дыскин. — М.: Издательский дом МЭИ, 2014.
3. **Chen, Q. Energy, exergy and economic analysis of a hybrid spray-assisted low-temperature desalination/ thermal vapor compression system** / Q. Chen, M. KumJa, Y. Li, K. J. Chua // Energy. — Vol. 166. — 2019. — P. 871 – 885. ISSN 0360-5442.
4. **Сазанов, Б. В. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий:** учеб. пособ. для вузов / Б. В. Сазанов, В. И. Ситас. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. **Внуков, А. К. Защита атмосферы от выбросов энергообъектов:** Справочник / А. К. Внуков. — М.: Энергоатомиздат, 1992.
6. **Патент № 2650446 РФ МПК F01K 19/02 (2006.01)** / Хромченков В. Г., Жигулина Е. В., Мурашов Л. М., Яворовский Ю. В.; заявитель и патентообладатель(и): федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский университет “МЭИ” (ФГБОУ ВО “НИУ “МЭИ”) (RU); заявл.: 2017121970, 22.06.2017; опубл.: 13.04.2018 Бюл. № 11.
7. **Иванова, Г. М. Теплотехнические измерения и приборы:** учебник для вузов / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. — М.: Издательский дом МЭИ, 2005.
8. **Junling, Yang. Study on mechanical vapor recompression system with wet compression single screw compressor** / Junling Yang, Chong Zhang, Zhentao Zhang, Luwei Yang, Wenye Lin // Applied Thermal Engineering, Volume 103. — 2016. — P. 205 – 211. ISSN 1359-4311.
9. **Данилов, О. Л. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях:** учебник для вузов / О. Л. Данилов, А. Б. Гаряев и др. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
10. **Bin, Hu. Water vapor compression and its various applications** / Bin Hu, Di Wu, R. Z. Wang. Renewable and Sustainable // Energy Reviews. — Vol. 98. — 2018. — P. 92 – 107. ISSN 1364-0321.

References

1. **Rotach V. Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya** (Theory of automatic control), Moscow, Publ. MPEI, 2008.
2. **Zhigulina E. V., Kalinin N. V., Yavorovsky Yu. V., Dyskin L. M. Kharakteristiki tekhnologicheskikh energonositelei i energosistem promyshlennykh predpriyatii** (Characteristics of technological energy carriers and energy systems of industrial enterprises), Moscow, Publ. MPEI, 2014.
3. **Chen Q., KumJa M., Li Y., Chua K. J. Energy, exergy and economic analysis of a hybrid spray-assisted low temperature desalination/thermal vapor compression system**, Energy, Vol. 166, 2019, pp. 871 – 885, ISSN 0360-5442.
4. **Sazanov B. V., Sitas V. I. Teploenergeticheskie sistemy promyshlennykh predpriyatii** (Thermal energy systems of industrial enterprises), Moscow, Energoatomizdat, 1990.
5. **Vnukov A. K. Zashchita atmosfery ot vybrosov energoobektov** (Protection of the atmosphere from emissions of energy facilities), Moscow, Energoatomizdat, 1992.
6. **Khromchenkov V. G., Zhigulina E. V., Murashov L. M., Yavorovsky Yu. V. Patent № 2650446 RF MPK F01K 19/02 (2006.01)** (Patent No. 2650446 of the Russian Federation IPC F01K 19/02 (2006.01)), claimed 2017121970, 22.06.2017, publ. 13.04.2018, Bul. No. 11.
7. **Ivanova G. M., Kuznetsov N. D., Chistyakov V. S. Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory** (Thermotechnical measurements and devices), Moscow, Publ. MPEI, 2005.
8. **Junling Yang, Chong Zhang, Zhentao Zhang, Luwei Yang, Wenye Lin. Study on mechanical vapor recompression system with wet compression single screw compressor**, Applied Thermal Engineering, Volume 103, 2016, pp. 205 – 211, ISSN 1359-4311.
9. **Danilov O. L., Garyaev A. B. Energosberezhenie v teploenergetike i teplotekhnologiyakh** (Energy saving in heat power engineering and heat technologies), Moscow, Publ. MPEI, 2010.
10. **Bin Hu, Di Wu, Wang R. Z. Water vapor compression and its various applications**, Renewable and Sustainable, Energy Reviews, Vol. 98, 2018, pp. 92 – 107, ISSN 1364-0321.

YavorovskyYV@mpei.ru

Features of using low-potential steam in heat supply systems

Khromchenkov V. G., Murashov L. M., Zhigulina E. V., Yavorovskii Yu. V.

A method of increasing the energy efficiency of industrial enterprises by compressing low-grade steam is presented. The direct use of thermal energy of the low-grade steam is usually inefficient. The energy costs for increasing the steam pressure including the electricity consumption are analyzed. A developed methodology for determination of saving fuel heat when replacing fresh steam with compressed steam produced in a boiler room of the enterprise or obtained from the steam turbines of a CHP plant is presented.

Keywords: energy efficiency, internal energy resources, low-grade steam, compressor, cogeneration plant, industrial enterprise.

CONTENTS

PROJECTS AND RESEARCH

Anuchin A. S., Il'in G. G., Dorozhkin A. A. Promising technical solutions for implementation of an autonomous dispatch system for environmentally protected water bodies and public utilities 2

Shikhin V. A., Abd Elraheem A. K., Pavlyuk G. P. Statement of optimization problem in designing a multi-agent stand-alone micro-energy system 13

Vlasova E. P., Khmara G. A., Makhmutova V. R. Models of digital signal transmission processes using different IEC 61850 protocols 22

Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Shelginskii A. Ya. Modeling of the heat transfer in capillary-porous coatings in power plants 31

Gasho E. G., Bebko D. A., Kondrakhov V. A. Power industry of the "enclave": challenges and solutions 39

SAVING ENERGY RESOURCES

Kozhevnikov V. A., Popov S. K., Yakovlev I. V. The efficiency of using heat generators operating on waste oil products 44

Khromchenkov V. G., Murashov L. M., Zhigulina E. V., Yavorovskii Yu. V. Features of using low-potential steam in heat supply systems 53

Продолжается подписка
на наш журнал
на II полугодие 2020 года.

Подписку можно оформить
через редакцию.

Главный редактор **С. А. ЦЫРУК**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Б. Н. Абрамович, Ю. В. Балабан-Ирменин, М. Я. Басалыгин, М. Г. Баширов, И. В. Белоусенко, В. В. Вахнина, В. А. Вростосаблина, А. В. Волков, Е. Г. Гашо, И. Д. Грачев, Н. Ф. Джагаров (Болгария), **В. В. Ивакин** (научный редактор), **Е. Н. Касьянова** (ответственный секретарь), **В. С. Копырин, Ю. В. Матюнина, С. А. Михайлов, Л. А. Новелла** (зам. гл. редактора), **Г. Б. Онищенко, Я. Пихоцки** (Польша), **С. К. Попов** (зам. гл. редактора по теплоэнергетике), **Е. Н. Рыжкова** (зам. гл. редактора по электроэнергетике), **Л. Е. Федоров**, **Э. Харцвельд** (Германия), **К. Ф. Шарафеддин** (Ливан), **А. В. Щербаков**

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

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

Адрес редакции: 115280, Москва, 3-й Автозаводский проезд, д. 4, корпус 1.
Телефоны: (495) 234-74-49, 234-74-18.
Http://www.promen.energy-journals.ru E-mail: prom_energy@rambler.ru, prom-energe@yandex.ru

Сдано в набор 14.04.2020. Подписано в печать 21.05.2020. Дата выхода в свет 9.06.2020. Формат 60 × 84 1/8. Печ. л. 7,0. Тираж 2500 экз. Заказ ПЭ06/20. Цена — свободная.

Адрес для переписки: АО НТФ "Энергопрогресс", 129090, Москва, ул. Воронцовская, д. 8

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

Типография издательского дома "ФОЛИУМ"

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСЕЙ

Статьи, направляемые в журнал "Промышленная энергетика", должны иметь объем не более 15 страниц набранного на компьютере текста (14 кеглем через полуторный интервал) и 3 рисунков.

При подготовке статьи должны выполняться следующие требования:

1. В редакцию статья присылается по электронной почте или передается через сайт.

2. Сведения, приводимые в статье, должны содержать минимальное количество формул (в отдельных строках). Русские и греческие буквы даются прямо, латинские — курсивом.

Единицы физических величин, входящих в формулы, должны быть указаны в соответствии с Международной системой (СИ).

3. Рисунки (**цветные**) выполняются в соответствии с действующими стандартами. На них должны быть обозначены только те номера позиций, на которые есть ссылки в рукописи. Рисунки не должны содержать мелких несущественных деталей, так как в процессе печати они могут оказаться неясными.

Фотоснимки должны быть четкими и контрастными.

Рисунки и подрисуночные подписи в текст не монтируются, приводятся на отдельных страницах.

4. В таблицах все наименования следует указывать полностью, не сокращая слов (за исключением единиц измерения физических величин).

5. Список литературы приводится в конце статьи в порядке последовательности ссылок в тексте. Для журнальных статей указываются фамилии и инициалы всех авторов, название статьи, наименование журнала, год издания, номер, том, для книг — фамилии и инициалы всех авторов, название книги, наименование издательства, город и год издания. Не допускается указывать одного или нескольких авторов с припиской "и др.". **Иностранные источники приводятся в оригинальном написании.** В список литературы включаются только опубликованные материалы.

6. В конце статьи следует дать подпись автора (авторов), указать фамилию, имя и отчество (полностью), год рождения, домашний адрес, шестизначный почтовый индекс, место работы, должность, ученую степень (или звание), а также номера телефонов и e-mail для переписки с редакцией.

7. К статье должны быть приложены автореферат (примерно половина страницы) и ключевые слова, контактные адреса (e-mail для переписки читателей с авторами), справка о том, что статья не была опубликована, а также сопроводительное письмо.

8. В статьях аспиранов желательно в соавторах указывать научного руководителя.

Статьи следует направлять в редакцию журнала по адресу:
115280, Москва, 3-й Автозаводский проезд, д. 4, корпус 1

E-mail: prom-energe@yandex.ru