

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры



На правах рукописи

**КОНДРЫКИНСКАЯ АННА ВИКТОРОВНА**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И  
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНДЕНСАЦИОННЫХ КОТЛОВ**

05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,  
газоснабжение и освещение

**Диссертация**

**на соискание научной степени кандидата технических наук**



Научный руководитель:

д.т.н., профессор

Высоцкий С.П.

Идентичность всех экземпляров подтверждаю

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 1.005.01



З.В. Удовиченко

Макеевка – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ	10
Выводы по разделу	22
РАЗДЕЛ 2. ОБСЛЕДОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛА ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ И ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫХ НУЖД	24
2.1 Анализ потребления природного газа на коммунальные нужды	24
2.2 Анализ потребления природного газа на отопление в зависимости от объема зданий	29
Выводы по разделу	34
РАЗДЕЛ 3. СНИЖЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ	36
3.1 Обзор исследований по генерации тепла в конденсационных теплогенераторах	36
3.2 Конструктивные и технологические решения при выполнении конденсационных теплоутилизаторов	39
3.3 Выбор конструктивных характеристик конденсационных котлов	46
3.4 Определение возможности исключения дымососа из технологической схемы подогрева воды	47
3.5 Влияние захлаживания продуктов сгорания на теплоотдачу к подогреваемой воде	50
3.6 Влияние основных параметров работы котла на коэффициент теплопередачи	55
Выводы по разделу	59
РАЗДЕЛ 4. УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ КОНДЕНСАЦИОННЫХ КОТЛОВ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НАСЫЩЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА	60

4.1 Обоснование необходимости улучшения экологических показателей котлов, используемых в системах теплоснабжения	60
4.2 Обоснование необходимости удаления диоксида углерода из теплоносителя	65
4.3 Влияние температуры на абсорбцию диоксида углерода из продуктов сгорания природного газа и интенсивности образования отложений	66
4.4 Влияние щелочности и pH воды на равновесное содержание диоксида углерода	73
Выводы по разделу	76
РАЗДЕЛ 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА	78
5.1 Использование возобновляемых источников энергии	78
5.2 Характеристика основных показателей теплоснабжения от тепловых электростанций	85
5.3 Применение аккумуляторов теплоты в теплогенерирующих системах теплоснабжения	102
Выводы по разделу	124
ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	126
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	128
ПРИЛОЖЕНИЕ А	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	139
ПРИЛОЖЕНИЕ В	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	142
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	148
ПРИЛОЖЕНИЕ И	149
ПРИЛОЖЕНИЕ К	150

## **ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

$K_{ит}$  - коэффициент использования топлива;

ТЭС – тепловая электростанция;

АЭС – атомная электростанция;

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

ГТУ – газотурбинные установки;

КПД – коэффициент полезного действия;

ФРГ – Федеративная республика Германия;

НАН – Национальная академия наук;

ВВП – внутренний валовый продукт;

ГЭН – график электрической нагрузки;

ТАМ – теплоаккумулирующие материалы;

АТ – аккумуляторы тепла;

АФП – аккумуляторы фазового перехода.

ЗОП - загрязнители органической природы



## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Использование топливно-энергетических ресурсов в Украине осуществляется с малой эффективностью. Это приводит к большим объемам импортных поставок топлива, что вызывает зависимость работы базовых отраслей промышленности и коммунального хозяйства от стран-импортеров и влечет угрозу энергетической безопасности страны. Вместе с этим Украина имеет большой потенциал энергосбережения, который составляет около 50% от годового объема потребления топливных ресурсов.

В современных условиях большая часть теплоты производится в централизованных котельных. В результате разветвленной системы трубопроводов значительное количество теплоты, а, следовательно, и топлива тратится на подогрев атмосферы. Кроме этого тратится значительная масса воды, которая создает целый ряд экологических проблем.

Для повышения эффективности систем теплоснабжения возникает необходимость решения целого комплекса вопросов: обеспечение более эффективного использования природного газа с внедрением конденсационных котлов или использования возобновляемых энергоносителей и электрической энергии, разработка технических решений для повышения надежности тепловых сетей за счет исключения из воды коррозионно-активных веществ: кислорода и углекислого газа.

Внедрение конденсационных котлов на малых котельных обеспечивает маневренность работы оборудования и коэффициент использования топлива на котлах 95-100%.

Принимая во внимание необходимость разработки и внедрения технологических решений, которые обеспечивают устойчивое развитие страны, важным вопросом является также обоснование возможности использования возобновляемых источников и электрической энергии. Ввиду того, что стоимость электрической энергии в межпиковый промежуток времени значительно меньше, чем в «пиковый», появляется необходимость разработки мероприятий для

потребления электрической энергии в ночные часы и аккумулирования теплоты на длительное время.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Работа выполнена в соответствии с Комплексной программой «Энергетическая стратегия Украины до 2030 года», утвержденной Кабинетом Министров Украины от 01.03.2006 г. №145-р., (раздел «Приоритетные направления и объемы энергосбережения, потенциал развития нетрадиционных и возобновляемых источников энергии до 2030 года»), а также по планам кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, госбюджетных научно-исследовательских работ кафедры: «Разработка теоретических моделей технических и технологических решений, которые обеспечивают эффективное функционирование инженерных сетей тепло-, водоснабжения и водоотведения» (Д-2-05-11), «Разработка теоретических и технологических принципов, которые обеспечивают внедрение новейших технологий системы функционирования ЖКХ» (Д-2-05-09).

**Целью диссертационной работы** является теоретическое и экспериментальное обоснование использования методов повышения экономичности, надежности и экологичности конденсационных водогрейных котлов, оборудованных массо- и теплообменной насадкой.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи исследования**:

- выполнить анализ существующих систем теплоснабжения;
- обосновать влияние на коэффициент использования тепла объемов помещений;
- усовершенствовать математическую модель работы конденсационных котлов, оборудованных тепло- и массообменной насадкой из колец Рашига;
- определить влияние температуры теплоносителя на степень его насыщения углекислым газом как в результате прямого контакта теплоносителя с продуктами сгорания природного газа, так и в результате термической деструкции гидрокарбонатов;
- определить эмиссию  $\text{NO}_x$  на конденсационном котле, оборудованном массо- и теплообменной насадкой;

- разработать и проверить экспериментально технические решения по снижению выбросов оксидов азота;
- определить эффективность и целесообразность использования альтернативных источников теплоснабжения.

**Объект исследования** – энергосбережение и экологическое совершенствование систем теплоснабжения.

**Предмет исследования** – массообменные процессы и процессы генерации тепла в конденсационных котлах с непосредственным контактом дымовых газов с водой.

**Методы исследования.** Теоретический и практический анализ процессов производства, потребления и аккумулирования энергии для отопления. Проведение опытов по равновесному насыщению воды карбоновым газом и аккумулированию энергии с использованием кристаллогидратов с фазовым переходом в лабораторных условиях и на полупромышленном оборудовании на конденсационных котлах с использованием расходомеров природного газа и воды, термометров сопротивления, термопар, концентратометров и станций сбора данных.

**Научная новизна полученных результатов:**

- впервые получены экологические и технологические показатели работы котлов с непосредственным контактом теплоносителя с водой, оборудованных массо- и теплообменной насадкой, что позволяет уменьшить потребление природного газа на 15-20%;
- впервые получены критериальные уравнения, которые характеризуют процесс теплообмена в насадках из колец Рашига конденсационных котлов;
- впервые получены аналитические зависимости поглощения водой углекислого газа из дымовых газов, при различных качестве воды и температуре;
- впервые обоснован метод снижения эмиссии оксидов азота за счет уменьшения времени пребывания в зоне высоких температур с последующим охлаждением продуктов горения;

- усовершенствован расчет технико-экономических показателей использования электрической энергии с регулируемым потреблением для отопления помещений;

- получило дальнейшее развитие определение потребления топлива на примере 3-х городов Украины и показано его отличие от показателей ДБН.

#### **Практическое значение полученных результатов:**

- впервые разработаны и внедрены новые методы предупреждения насыщения воды карбоновым газом при непосредственном контакте дымовых газов и теплоносителя;

- экономический эффект от внедрения системы обогрева одного дома объемом 21000 - 25000 м<sup>3</sup> составляет 230 тыс. грн. в год;

- определены расходы энергии на теплоснабжение для зданий разного объема и этажности на основании анализа теплоснабжения в 2-х климатических зонах;

- обосновано использование аккумулирования тепловой энергии в веществах с фазовым переходом и ультразвуковым инициированием перехода из жидкого в твердое состояние.

- разработано и запатентовано в Украине устройство для аккумулирования тепла с использованием фазового перехода кристаллогидратов № 74690 № и 2012 04232; заяв. 05.04.12; опубл. 12.11.12, бюл. №21.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты исследований и выводы получены автором самостоятельно. В работах, которые опубликованы в соавторстве, автором лично выполнено следующее:

- выполнен анализ потребления тепла в трех городах Украины в коммунальных и общественных зданиях; определены зависимости удельных расходов топлива от объемов зданий;

- разработаны критериальные зависимости, в которых определяется влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на показатели работы котлов, оборудованных тепло- и массообменной насадкой;

- исследовано влияние температуры теплоносителя и длительности его нагрева на степень поглощения карбонового газа в котлах СВТ (системы

Высоцкого и Трубицина) в промышленных условиях и в лабораторных опытах;

- обосновано использование возобновляемых энергоносителей и электрической энергии для теплоснабжения;
- исследованы и определены основные параметры процесса аккумулирования тепла в веществах с фазовым переходом.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты работы и материалы исследований докладывались и обсуждались на II Региональной научной конференции аспирантов и студентов «Экологические проблемы топливно-энергетического комплекса» в Донецком национальном техническом университете (ДонНТУ) в 2011 году, на научно-технической конференции в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (ДонНАСА) в 2012 году, на VI научно-практической конференции «Донбасс-2020: перспективы развития глазами молодых ученых» в г. Донецке в 2012 году, на научном семинаре «Зеленая экономика: возможности и перспективы» в «Эксподонбассе» в 2012 году, на международной научно-практической конференции «Архитектура, градостроительство, историко-культурная и экологическая среда» в г. Брянске в 2014 году.

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 12 печатных работах, общим объемом 2,2 п.л., лично автором – 1,25 п.л., в том числе в 6 рецензируемых научных изданиях: 6 работ опубликованы в изданиях, включенных в перечень специализированных научных журналов, утвержденный МОН Украины; 1 - публикация включена в международную наукометрическую базу РИНЦ. По результатам исследований получен патент Украины на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти основных разделов, выводов, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы составляет 154 страницы, в том числе 119 основного текста, 9 полных страниц с рисунками и таблицами, 10 страниц использованных источников, 17 страниц приложений.

## РАЗДЕЛ 1

### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

Неэффективное внутреннее использование топливно-энергетических ресурсов вызывает большие объемы их импортных поставок, что определяет зависимость работы базовых отраслей экономики и коммунального хозяйства от стран-импортеров. Это создает угрозу энергетической безопасности страны.

Наряду с этим Украина имеет большой потенциал энергоэффективности и энергосбережения, который составляет более 50% от ежегодного объема потребления топливно-энергетических ресурсов.

В соответствии с базовым сценарием развития экономики [1,2] к 2030 году предполагается увеличение производства валового внутреннего продукта (ВВП) почти в 3 раза. Соответственно, энергоемкость ВВП должна снизиться с 0,5 кг топливного эквивалента (т.э) до 0,24 т.э на доллар ВВП.

Неэффективное использование топливно-энергетических ресурсов имеет место во всех секторах экономики страны, в первую очередь при производстве, транспортировке и использовании тепловой и электрической энергии. В современных условиях жилищно-коммунальное хозяйство является наиболее отсталой отраслью экономики страны. В критическом состоянии находятся тепловые сети, что приводит к тяжелым аварийным ситуациям (г. Алчевск, г. Киев). Из 40 тыс. км тепловых сетей в аварийном состоянии находится больше половины, износ достиг почти 70%. Износ сетей обусловлен интенсивной углекислотной коррозией из-за некачественной системы подготовки подпиточной воды и ее деаэрации.

При отоплении зданий необходимо с одной стороны обеспечить тепловой комфорт, с другой, снизить расходы топлива. Это достигается за счет применения более совершенных систем тепловой изоляции зданий.

В работах Жуковского С.С., Кинаша О.В., Петраша В.Д. рассмотрены различные аспекты проблемы совершенствования тепловой изоляции зданий и снижения потерь тепла через ограждающие конструкции [3].

Ограниченность запасов топлива, и в первую очередь высокореакционного – природного газа вызывает необходимость поиска путей его эффективного использования. Учитывая значительное количество отраслей промышленности – приоритетных претендентов на использование природного газа с каждым годом труднее обосновывать, что данный потребитель – системы отопления не имеет альтернативных источников.

По-видимому, сложно противостоять использованию природного газа в химической промышленности, которая обеспечивает сельское хозяйство удобрениями и, соответственно, обеспечивает получение белковой пищи для людей. Однако, в ближайшие 10-15 лет природный газ останется одним из наиболее применяемых видов топлива для теплофикационных котельных. Главным направлением экономии природного газа является повышение коэффициента использования топлива ( $K_{ит}$ ).

В современных системах водоподготовки осуществляется только более-менее качественное умягчение воды в натрий-катионитных фильтрах. Присутствующий в поверхностных водах гидрокарбонат-ион не удаляется и при подогреве воды в котлах термически разлагается с образованием угольной кислоты, являющейся причиной коррозионных процессов. Таким образом, возникает необходимость решения проблем повышения надежности и эффективности систем теплоснабжения за счет применения более современных котлов, работающих с высоким КПД, использования нетрадиционных энергоносителей и решения вопросов предотвращения насыщения теплоносителя коррозионно-активными компонентами. С целью утилизации тепла дымовых газов котлов типа ДКВР, ТВГ и КВГ в Институте технической теплофизики НАН Украины была разработана контактная теплоизоляционная установка, которая позволила на котлах, сжигающих газообразное топливо, также снизить эмиссию оксидов азота [1]. Установка состоит из контактного экономайзера и контактного воздухоподогревателя, объединенных в общий водяной контур с циркуляционным насосом и промежуточным теплообменником.

Снижение образования оксидов азота происходит за счет подачи в топку котла увлажненного и подогретого воздуха и за счет промывки продуктов горения

в контактном водяном экономайзере. Установка позволяет утилизировать как тепло продуктов горения топлива, так и скрытую теплоту конденсации водяных паров.

Согласно данным [4,5] при эксплуатации теплогенераторов по разработанной технологии, эмиссия оксидов азота в атмосферу сокращается на 50-60%, а расход природного газа - на 8-10%.

Учитывая то, что при непосредственном контакте продуктов сгорания природного газа с подогреваемой водой происходит насыщение ее углекислым газом, для защиты тепловых сетей от коррозии требуется декарбонизация воды за счет продувки теплоносителя воздухом, деаэрация теплоносителя в вакуумных деаэраторах или нейтрализация щелочным реагентом.

Все три решения имеют ряд недостатков, а именно:

- насыщение теплоносителя кислородом, в результате чего углекислотная коррозия тепловых сетей замещается кислородной, кроме того, при продувке воздухом снижается температура сетевой воды;
- необходимость использования громоздкого и энергоемкого оборудования при использовании вакуумной деаэрации;
- постепенное накопление в сетевой воде солей – продуктов нейтрализации угольной кислоты.

При сжигании в теплофикационных котлах природного газа и при расчете теплового баланса по низшей теплоте сгорания « $K_{ит}$ » в котельных изменяется от 85% до 94%, потеря топлива с уходящими газами составляет от 6% до 15%. При расчете теплового баланса котельных установок по высшей теплоте сгорания « $K_{ит}$ » для наиболее совершенных котлов, сжигающих природный газ, не превышает 80%.

Повышение уровня « $K_{ит}$ » отопительно-производственных и энергетических котлов может быть достигнуто за счет глубокого охлаждения продуктов сгорания природного газа ниже точки росы и максимального использования физической теплоты газов и скрытой теплоты парообразования водяных паров.

Исследования, выполненные рядом авторов [6-8] прежде всего Ароновым И.З. и Семенюком Л.Г., в Научно-исследовательском институте



санитарной техники и оборудования зданий и сооружений (г. Киев), коллективом ученых Института технической теплофизики под руководством Академика НАН Украины Долинского А.А. и член-корреспондентом НАН Украины Баском Б.И., Института газа под руководством Академика НАН Украины Карпом И.Н., показали что при глубоком охлаждении продуктов сгорания природного газа ниже точки росы в разных конструкциях теплогенераторов позволило существенно повысить  $\langle K_{ит} \rangle$ . Предпочтительным является обеспечение большой межфазной поверхности в единице объема и использование для отбора тепла от дымовых газов воды, имеющей температуру ниже точки росы. При этом удастся сконденсировать большую часть водяных паров, содержащихся в дымовых газах, и использовать выделяющуюся при конденсации паров скрытую теплоту. В этом случае обеспечивается также более полный отбор физического тепла от продуктов сгорания и, соответственно, более высокий  $\langle K_{ит} \rangle$  дополнительно за счет отбора тепла конденсации. Следует отметить, что соотношение высшей и низшей теплоты сгорания природного газа для большинства сжигаемых в Украине природных газов составляет 1,12 [9].

Глубокое охлаждение продуктов сгорания природного газа сопряжено также с необходимостью учета условий работы оборудования, работающего за «хвостом» котла: дымоходов (боровов), дымососов и дымовой трубы. В практике эксплуатации имели место случаи разрушения дымовых труб из-за конденсации влаги при низких тепловых нагрузках котлов.

Необходимое охлаждение дымовых газов должно быть реализовано либо в самом котле или теплоутилизаторе. При этом конденсация водяных паров позволяет с одной стороны отобрать их теплоту конденсации, с другой стороны – обеспечить надежную работу газоходов, дымососа и дымовой трубы. Кроме этого, поверхность последних элементов должна быть по возможности меньше. Лучшим вариантом является отказ от дымососа и возможно более короткие элементы дымоходов.

Основные результаты исследований выполнены на контактных экономайзерах, установленных за хвостовыми поверхностями котла [9]. При этом температура дымовых газов за хвостовыми поверхностями котла достигла 250-

300°C. Глубина охлаждения дымовых газов определяется потребностью в воде. Семенюк Л.Г. рассматривал использование подогрева воды для химводоподготовки на тепловых электростанциях (ТЭС). Однако количество «сбрасываемого» после котлов тепла существенно больше такого потребителя слабоподогретой воды как химводоочистка ТЭС.

Для отбора тепла от дымовых газов могут быть использованы следующие типы аппаратов:

- теплообмен между дымовыми газами и водой в каскадных аппаратах происходит при стекании воды с полки на полку, при многократном поперечном смывании водяных струй газами и барботировании газов через тарелки и пленку стекающей воды; интенсивность тепло- и массообмена в этих аппаратах невысока;

- в барботажных аппаратах применяется нагрев жидкости до высокой температуры при небольшой высоте барботажного слоя. Однако для их использования требуется установка в зоне горячих газов специального высоконапорного дымососа.

- высокой интенсивностью теплообмена обладают пенные аппараты, однако они имеют высокое аэродинамическое сопротивление, что вызывает увеличение расхода электрической энергии на собственные нужды.

В химической промышленности и в водоподготовке на ТЭС широко применяются насадочные аппараты. Контактная камера в этих аппаратах заполнена кольцами Рашига, кольцами Палля, седловидными насадками Берли и пр. Контактные камеры, выполненные из колец или седел отличаются высокой удельной поверхностью на единицу объема, достигающей 200-220 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Это обеспечивает высокую интенсивность процессов тепло- и массообмена, что позволяет получить малые габариты оборудования при относительно большой мощности.

Массообмен между дымовыми газами и водой происходит в обоих направлениях: при испарении воды и конденсации паров из дымовых газов. Высоцким С.П. и Трубицыным А.Н. разработан котел СВТ [10,11], в котором дымовые газы, полученные в камере сгорания, непосредственно контактируют с

подогреваемой водой. Котел оборудован массо- и теплообменной насадкой из колец Рашига помещенных в цилиндрический корпус. Вокруг первого цилиндрического корпуса образуется щелевое пространство, которое секционировано спиралеобразными перегородками. В этом пространстве проходит холодная вода. Таким образом, зона «горячей» воды экранируется «холодной» зоной, по которой холодная вода поступает в зону смешения. Таким образом, создается необходимый уровень подогрева воды. В отличие от традиционных контактных подогревателей, предназначенных для утилизации тепла, дымовые газы с высокой температурой поступают непосредственно на насадку. Это обеспечивает термическую деаэрацию воды за счет подогрева воды до температуры близкой к 100°C и частичное кипение воды. В верхней части насадки происходит конденсация паров воды, образующихся в результате горения природного газа и частичного испарения воды в нижней части насадки. При этом обеспечивается удаление из воды основной массы углекислого газа, образующегося в результате его поглощения в верхней части насадки и за счет термической диссоциации гидрокарбоната кальция содержащегося в воде. Кроме этого происходит удаление из воды кислорода. Для исключения последующего поглощения углекислого газа подогретой водой из дымовых газов аккумулятор сбора подогретой воды отделен от камеры сгорания гидрозатвором.

В работах Редько А.Ф., Губаря В.Ф., Лукьянова А.В., Олексюка А.А. и Андрийчука Н.Д. [12-14] рассмотрены различные аспекты совершенствования систем отопления за счет применения более совершенных систем теплоснабжения, конструкций котлов, а также систем автоматического контроля и регулирования работы котлов.

Работа котлов тесно связана с системой регулирования подачи тепла в тепловых сетях. Качественное регулирование, которое осуществляется путем снижения температуры теплоносителя, приводит к такому режиму работы котла, когда температура обратной воды снижается ниже 54°C, т.е. ниже точки росы для продуктов сжигания топлива. При расчетной температуре 70°C в подающей магистрали подобная ситуация имеет место уже при температуре наружного воздуха - 13 °C и выше, т.е. основного периода времени отопительного сезона.

Это, с одной стороны, обеспечивает работу котлов в конденсационном режиме, а с другой – требует применения мероприятий по защите газового тракта от коррозии.

Указанные проблемы с дефицитом природного газа, если не оправдаются надежды на получение дешевого сланцевого газа, вынуждают искать меры для его замены с использованием альтернативных источников. Из альтернативных источников наиболее перспективным предполагается использование биомассы (в твердом состоянии), биогаза и электроэнергии.

Применение биомассы: мискантуса, верболоза, отходов древесины требует изменения конструкций большинства котлов, применения котлов, оборудованных колосниковой решеткой. Кроме этого, требуется устройство хранилищ для биомассы (последняя должна храниться под навесом или в закрытых помещениях) и применение устройств для ее измельчения.

Выращивание рапса, которое уже осуществляется в больших масштабах в Украине, позволяет использовать его после получения масел на достаточно простом оборудовании, не требующем квалифицированного обслуживания, для сжигания в традиционных водогрейных котлах, оборудованных двухтопливными горелками. Для сжигания масел в котлах, в отличие от двигателей внутреннего сгорания, не требуется его этерификация. Достоинством такого топлива, в отличие от природного газа, является то, что оно может накапливаться у потребителя. Природный газ, как известно, тоже может накапливаться в государственном масштабе в подземных горизонтах.

В отличие от других видов топлива биомасса обеспечивает также существенное увеличение количества рабочих мест (для производства, выращивания и утилизации биомассы). Например, Департамент сельского хозяйства США оценил, что 17 тысяч рабочих мест создается для производства каждого миллиона галлонов ( $3800 \text{ м}^3$ ) жидкого топлива. Исследовательский институт электрической энергии оценил, что производство 5,25 млрд ГДж электроэнергии на площади 20 млн га увеличит доходы фермеров на 12 млрд долларов США ежегодно [66]. Это корреспондируется с политикой правительства Украины по подъему уровня сельскохозяйственных районов.

Использование энергии биомассы также обеспечивает экологические преимущества – способствует смягчению проблемы изменения климата, уменьшает количество кислотных дождей, снижает эрозию почвы, загрязнение водоемов и пр. Энергетические плантации могут располагаться на непригодных землях, затапливаемых территориях, а также местах, разделяющих посевные площади. Во всех случаях энергетические культуры обеспечивают стабилизацию почвы, уменьшая эрозию.

Использование нетрадиционных источников тепла рассмотрено в работах Гелетухи Г.Г. и Редько А.А. [15,16]

Следующим альтернативным топливом является электрическая энергия. Электроэнергия производится с достаточно низким коэффициентом полезного действия (0,3-0,35) и является, соответственно, ресурсоемким и дорогим продуктом. Однако электрическая энергия производится в Украине с использованием недефицитного и относительно недорогого твердого топлива на ТЭС и с использованием ядерного топлива на АЭС.

Особенностью электрической энергии является то, что она производится в момент потребления.

Дифференцированное потребление в течении суток, дней в неделю вызывает необходимость остановки энергетического оборудования или его значительной разгрузки. Оба решения вызывают увеличение расходов топлива. Энергогенерирующие компании стимулируют потребление энергии в ночное время снижением тарифов стоимости энергии. Еще одной особенностью электрической энергии является то, что она просто, без существенных потерь трансформируется в тепло. Логически просматривается решение использования электрической энергии в ночное время, трансформирования ее в тепло, аккумулирования тепла и его использования в течение суток. При этом возникает необходимость аккумулирования тепла.

Наиболее подходящим веществом для аккумулирования тепла является вода, обладающая достаточно высокой теплоемкостью. Однако применение водных аккумуляторов тепла в случае аккумулирования тепла даже для одного здания требует установки достаточно большого бакового хозяйства. В мировой

практике используют достаточно большое количество технологий аккумулирования, аккумулирующих веществ [17-19]. Наиболее предпочтительными для теплоснабжения по мнению автора диссертации являются аккумуляторы с фазовым переходом теплоносителя. Они относительно недороги и позволяют существенно уменьшить объемы бакового хозяйства и, соответственно, капитальные затраты на процесс аккумулирования тепла.

При реконструкции или строительстве систем теплоснабжения большое значение с экономической и технологической точек зрения имеет выбор централизованных или децентрализованных систем.

Очевидно, что централизованные системы необходимо использовать в тех местностях, в которых осуществляется комбинированное производство тепловой и электрической энергии на теплоэлектроцентралях. Применение децентрализованных систем обеспечивает существенный экономический эффект за счет снижения затрат на строительство протяженных тепловых сетей, их изоляцию, а также в результате снижения потерь тепла и теплоносителя при его транспортировке по тепловым сетям. Кроме этого, в последнем случае создается возможность использования нетрадиционных энергоносителей: древесины, отходов и продуктов сельскохозяйственного производства, аккумулирования тепла и использования тепловых насосов и когенерационных установок. Обычно системы отопления с тепловыми насосами имеют более высокий коэффициент использования первичной энергии по сравнению с другими системами отопления.

Потенциал энергосбережения в Украине с использованием различных теплонасосных систем приведен в табл. 1.1.

**Таблица 1.1. - Потенциал энергосбережения в Украине при использовании  
теплонасосных систем**

Источник низкопотенциальной энергии	Общий потенциал МВт·ч/год	Экономически целесообразный потенциал, МВт·ч/год	Область применения	Техническое решение	Оптимальная единичная мощность, кВт	Возможные отопительные площади помещений, тыс.м <sup>2</sup>	Срок окупаемости, год
Водооборотные циклы в энергетике и промышленности	$321,6 \cdot 10^8$	$12,0 \cdot 10^8$	Коммунальное жилье, промышленные объекты	КТН, АТН*	$5 \cdot 10^3$	50	5-8 3-5
Геотермальная энергия	$438 \cdot 10^9$	$17,6 \cdot 10^8$	Коммунальное жилье, промышленные объекты	Тепловые пункты КТН, АТН	200-1000	2-10	5-8 3-5
Сточные воды	$3,4 \cdot 10^7$	$12,7 \cdot 10^6$		КТН, АТН	1	10-50	-
Шахтные воды	$4,8 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^3$		КТН, АТН		10-50	-
Теплота грунта и грунтовых вод	$15,7 \cdot 10^4$	$10,5 \cdot 10^3$	Индивидуальное и коммунальное жилье	КТН	5-100	0,05-1,0	4-5 2-3
Теплота открытых водоемов	$10,4 \cdot 10^3$	$5,0 \cdot 10^3$		КТН	10-100	0,1-1,0	4-5 2-3
Вентиляционные выбросы	$0,8 \cdot 10^3$	$0,25 \cdot 10^3$		КТН, рекуперативные т/о	5-80	0,05-0,8	2-3 1,5-2
Солнечная энергия	неогранич	$53,8 \cdot 10^5$		КТН, АТН солнечные коллекторы	5-80	0,05-0,2	5-6 3-4

КТН – контактные теплонагреватели;

АТН – автономные теплонагреватели.

Как видно из приведенных данных, недостатком теплонасосного оборудования является относительно большой срок окупаемости, особенно, при использовании в качестве первичного теплоносителя почвы. При наличии поблизости больших водных источников и их использования в качестве первичного теплоносителя срок окупаемости снижается [20].

Проблемы использования теплонасосного оборудования в системах отопления рассмотрены в работах Бовкуна И.А. [18] и Скрыпникова В.Б. [21].

В когенерационных установках главной целью является выработка тепловой энергии необходимых параметров по заданному графику нагрузки. Получаемая электрическая энергия является попутным продуктом, благодаря выработке которого увеличивается экономичность процесса генерации тепловой и электрической энергии. В когенерационных технологиях используются различные тепловые двигатели. Наиболее распространенными являются двигатели внутреннего сгорания (ДВС) и газотурбинные установки (ГТУ). В термодинамическом цикле когенерационных систем используют обычно два рабочих тела, например в надстройке используют продукты сгорания топлива с высшей начальной температурой, а в котлах или паротурбинных установках – водяной пар с более низкой температурой.

Основные показатели работы когенерационного оборудования с газопоршневыми двигателями и газотурбинными установками приведены в таблице 1.2.

**Таблица 1.2 - Сравнение некоторых показателей работы газопоршневых двигателей и газотурбинной установки [1, 20]**

Показатель	Газопоршневой двигатель	Газотурбинная установка
1	2	3
Ремонтопригодность	Без ограничения при соблюдении правил эксплуатации	
Долговечность	Капитальный ремонт производится на месте; ремонт требует меньше времени	Капитальный ремонт производится на специальных заводах; требуются существенные затраты на транспортировку и центровку ротора турбины.



Продолжение табл. 1.2

1	2	3
Экономичность	КПД изменяется мало при изменении нагрузки от 100 до 50%	КПД резко снижается при разгрузке установки
Удельный расход топлива при нагрузках 100 и 50%	9,3...11,6 МДж/кВтч 0,264...0,329 м <sup>3</sup> /кВтч	13,2...17,7 МДж/кВтч 0,375...0,503 м <sup>3</sup> /кВтч
Падение напряжения и время восстановления после увеличения нагрузки на 50%	22% 8 с	40% 38 с
Работа в маневренном режиме	- Работа с нагрузками < 50% нежелательна (увеличиваются затраты на обслуживание); - Снижение единичной мощности агрегата увеличивает надежность теплоснабжения.	- Работа с частичной нагрузкой (< 50%) не влияет на состояние турбины; - Высокая единичная мощность создает опасность резкого снижения общей мощности установки.
Размещение в здании	- Установка занимает больше места, т.к. имеет больший удельный вес на единицу мощности; - Рабочее давление газа на входе 10...35 кПа, не требуется установка компрессора.	- Некоторый выигрыш в размерах помещения при мощности установки до 5 МВт; - Минимальное давление газа на входе 0,8-1,2 МПа; - Требуется дожимающий компрессор или газ высокого давления.
Обслуживание	- Остановка через каждые 1000 ч. работы, замена масла свечей; - Капитальный ремонт через 60000 ч. эксплуатации производится на масле.	- Остановка через каждые 2000 ч. работы; - Капитальный ремонт через 40000 ч. производится на специальном заводе.

Основным достоинством когенерационных установок является:

- существенное снижение стоимости выработанной энергии и тепла по сравнению с раздельным производством аналогичного количества электрической энергии и тепла;
- экономия природного газа по сравнению с раздельным производством обоих видов энергии на 3-12%;
- улучшение экологического состояния среды за счет снижения теплового загрязнения атмосферы и выбросов NO<sub>x</sub>;
- независимость от поставок электрической энергии за счет восполнения личных потребностей котельных и продажа избыточной энергии в электросеть;

- устойчивость работы оборудования, особенно, в условиях аварийных ситуаций.

Недостатком систем когенерации является большая сложность оборудования, необходимость привлечения к обслуживанию квалифицированного персонала и снижение экономичности работы оборудования в периоды отсутствия потребления тепла. В последнем случае возникает необходимость остановки оборудования и применения мероприятий по его консервации.

В системах отопления, как правило, используется качественное регулирование подачи тепла в тепловые сети. Оно осуществляется путем снижения температуры теплоносителя. При этом в течение большого периода времени для современных условий эксплуатации (относительно теплые зимы) температура обратной воды составляет ниже  $54^{\circ}\text{C}$ , т.е. ниже точки росы для продуктов сгорания. Это создает условия, когда водогрейные котлы работают в конденсационном режиме. Последнее приводит к интенсивной коррозии трубной системы котлов, дымоходов и дымовой трубы.

Рассмотренные проблемы повышения эффективности коммунальной теплоэнергетики показывают сложность, многоплановость и, зачастую, противоречивость решаемых задач.

Выводы по разделу:

1. Ограниченность запасов природного газа и постоянное повышение его стоимости вызывает необходимость поиска методов его более эффективного использования, а также применения альтернативных энергоносителей.

2. Анализ работы водогрейных котлов показывает, что повышение коэффициента использования топлива может быть достигнуто за счет прямого контакта дымовых газов с подогреваемой водой. Однако при этом увеличивается опасность коррозии тепловых сетей в результате насыщения подогреваемой воды углекислым газом.

3. Использование возобновляемых источников энергии позволяет существенно улучшить экологические показатели работы котлов. При этом

требуется оценка экономических показателей использования различных видов энергоносителей.

4. Эффективным решением уменьшения потерь в системах отопления является применение децентрализованного теплоснабжения. При этом возникает необходимость использования котлов другого типа (по мощности и конструктивным особенностям).

## РАЗДЕЛ 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛА ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ И ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫХ НУЖД

#### 2.1 Анализ потребления природного газа на коммунальные нужды

Основными составными частями расходов природного газа является приготовление еды, приготовление теплой воды и отопление помещений. Расчет необходимого количества расходов газа для указанных потребностей можно выполнить следующим образом:

$$V = V_1 + V_2 + V_3, \quad (2.1)$$

где  $V$  – суммарное количество природного газа, который используется потребителями,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

$V_1$  – количество газа, которое используется на приготовление еды,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

$V_2$  – количество газа, которое используется на приготовление теплой воды,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

$V_3$  – количество газа, которое тратится на отопление,  $\text{м}^3/\text{сут}$ .

$$V_1 = \frac{V_{1a} + V_{1б} + V_{1в}}{3}; \quad (2.2)$$

$$V_{1a} = 0,2 \cdot t \cdot n, \quad (2.3)$$

где  $V_{1a}$  – количество газа, которое необходимо для приготовления еды по варианту "а" (использование газовой плиты),  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

0,2 – расход газа на одну горелку (давление 100-200 мм вод. ст.),  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$t$  – время сжигания газа в горелке на протяжении суток, ч/сутки;

$n$  – количество горелок, которые используются, шт.

$$V_{16} = \frac{3,14m + 2,5m_1}{Q}, \quad (2.4)$$

где  $V_{16}$  – количество газа, которое необходимо для приготовления еды по варианту "б" (с использованием принятых норм расходов энергии на 1 человека), м<sup>3</sup>/сут;

3,14 – количество энергии, которое необходимо для приготовления еды на одного взрослого члена семьи, МДж/сут [27];

2,5 – количество энергии, которое необходимо для приготовления еды на одного ребенка, МДж/сут [27];

$m$  – количество взрослых членов семьи, чел.;

$m_1$  – количество детей, чел.;

$Q$  – количество энергии при сжигании 1 м<sup>3</sup> природного газа, МДж/м<sup>3</sup> (33,6 МДж/м<sup>3</sup>)

$$V_{16} = 0,34 \cdot M, \quad (2.5)$$

где  $V_{16}$  – количество газа, которое необходимо для приготовления еды по варианту "в" (статистические данные), м<sup>3</sup>/сут;

$M$  – количество членов семьи, чел.;

0,34 – расход газа на одного человека на сутки, м<sup>3</sup>/сут [28].

Расход газа на подогрев воды:

$$V_2 = \frac{14m + 7,5m_1}{Q} \quad (2.6)$$

где 14 – количество энергии, которое необходимо для приготовления теплой воды в расчете на одного взрослого члена семьи, МДж/сут [28];

7,5 – количество энергии, которое необходимо для приготовления теплой воды в расчете на одного ребенка, МДж/сут [29];

Количество газа, которое нужно для отопления, можно определить следующим образом:

$$V_3 = \frac{K}{Q} \cdot S \quad (2.7)$$

где  $K$  – удельный расход энергии, которая необходима для отопления, МДж/м<sup>2</sup>·сут (значение  $K$  принимается 5-5,5 МДж/м<sup>2</sup>·сут) [29];

$S$  – площадь жилого помещения, которое подлежит обогреву, м<sup>2</sup>.

Исходя из приведенных формул определяем расход газа для среднестатистической семьи из 4-х человек (2 взрослых и 2 детей).

При использовании 2-х горелок по варианту "а" и длительности сжигания 2 часа:

$$V_{1a} = 0,2 \cdot 2 \cdot 2 = 0,8 \text{ м}^3$$

По варианту "б":

$$V_{1б} = \frac{3,14 \cdot 2 + 2,5 \cdot 2}{33,6} \approx 0,34 \text{ м}^3$$

По варианту "в":

$$V_{1в} = 0,34 \cdot 4 = 1,36 \text{ м}^3$$

Таким образом, средний расход газа на приготовление еды по разным расходам составляет на 1 семью:

$$V = \frac{0,8 + 0,34 + 1,36}{3} = 0,83 \text{ м}^3$$

Расход газа на подогрев воды:

$$V_2 = \frac{14 \cdot 2 + 7,5 \cdot 2}{33,6} = 1,28 \text{ м}^3$$

Расход газа на отопление помещения для семьи из 4-х человек в трехкомнатной квартире общей площадью 65 м<sup>2</sup> будет составлять:

$$V_2 = \frac{5,25 \cdot 65}{33,6} = 10,2 \text{ м}^3$$

Общий расход газа составляет:

$$V = 0,83 + 1,28 + 10,2 = 12,3 \text{ м}^3$$

Из приведенных расчетов видно, что основной расход газа (83%) приходится на обогрев квартиры зимой.

При стоимости газа 500 у.е. за 1000 м<sup>3</sup>, или 5,5 грн./м<sup>3</sup> расходы среднестатистической семьи на отопление будут составлять 16,50 грн./сут, или 495 грн./месяц. В современных условиях существующие расходы значительно превышают указанную величину. Это предопределено тем, что газ для теплоснабжения тратится очень неэффективно в результате значительных расходов тепла при транспортировке горячей воды и низкого коэффициента полезного действия котельного оборудования.

В современных условиях в большинстве городов Украины используется централизованное теплоснабжение с использованием для подогрева воды водогрейных котлов и паровых котлов с поверхностными подогревателями. Теплотрассы имеют значительную длину и во многих местах имеют неэффективную тепловую изоляцию.

Коэффициент использования топлива на большинстве отечественных котельных обычно не превышает 80%. В таблицах 2.1 и 2.2 представлены данные по одной из котельных, а именно №11 г. Харцызска.

**Таблица 2.1 - Показатели потребления топлива и отпуска тепла по котельной**

Год	Расход природного газа, тыс. м <sup>3</sup> /год	Отпущено тепла, Гкал	η <sub>котл</sub>
2007	9579,9	58043	0,767
2008	10495,7	62719	0,747
2009	10329	62228	0,753

**Таблица 2.2 - Отпуск тепла и коэффициент полезного действия по  
месяцам 2007 г.**

Месяц	G <sub>т</sub> , т/ут	Q <sub>потр.</sub> , Гкал	Q <sub>отп.</sub> , Гкал	η <sub>котл</sub>
Январь	1988,8	13921,6	10723	0,77
Февраль	2451,6	17161,2	13062	0,76
Март	1767,2	12370,4	9558	0,77
Апрель	123,2	862,4	706	0,818
Октябрь	143	1001	733	0,733
Ноябрь	2070,6	14494,2	10639	0,734
Декабрь	2456,9	17198,3	12622	0,733

Для повышения коэффициента использования топлива котлов в этой работе предложено использовать контактные экономайзеры на котлах централизованных котельных или водогрейные котлы, которые разработаны [22-26] и показаны в прил. А [10,11]. В последнем случае реализуется децентрализованное теплоснабжение, что позволяет избежать значительных расходов тепла при его транспортировке.

Следует отметить, что при этом значительно улучшается экологическая ситуация в городах, в результате устранения порывов трубопроводов, больших расходов воды, выхода из строя дорог и домов, и т.п.

В обоих случаях удастся использовать скрытую теплоту парообразования воды, которая значительно повышает коэффициент использования топлива котлов.

Показанный в прил. А котел СВТ имеет мощность N = 300 кВт, что позволяет использовать его для приготовления горячей воды и отопления помещения площадью F, которую можно определить по формуле

$$F = \frac{N \cdot 24 \cdot 3,6}{K} = \frac{300 \cdot 24 \cdot 3,6}{5,25} = 4937 \text{ м}^2.$$

Это равняется в среднем площади 76 квартир (одного большого дома).

Конечно, обогрев помещений может выполняться также за счет индивидуальных котлов мощностью, например, 4-5 кВт. Но, на наш взгляд более целесообразно использовать котельные на один-два дома, или комплекс домов,



расположенный около одного двора. Это обеспечит организацию подготовки более качественной воды для подпитки тепловой сети.

Очевидно, централизованное теплоснабжение с подключением к центральной котельной микрорайона или большой группы домов является обоснованным в случае использования для подогрева воды, например, оборудования по переработке отходов. Такая схема реализована в некоторых городах Европы, например в г. Вена (Австрия).

В указанном случае за счет экономии расходов топлива на доставку отходов и дешевый энергоноситель достигается значительный экономический эффект. Однако в таких условиях должны быть применены достаточно эффективные технологии по защите окружающей среды, особенно, по очистке газовых выбросов. Как видно из приведенного рисунка (прил. А) сам котел для сжигания отходов занимает приблизительно 20 % от общего объема оборудования. Можно отметить, что наша промышленность способна к выпуску почти всех компонентов оборудования, которое используется в приведенном технологическом процессе.

## 2.2 Анализ потребления природного газа на отопление в зависимости от объема зданий

Принимая во внимание значительные объемы топлива, которые тратятся на отопление помещений, важно оценить факторы, которые влияют на удельные расходы топлива. В терминологии западных стран существует понятие «дома нулевой энергии», или термодома. В таких домах с повышенной тепловой изоляцией используют термоблоки из полистирола, при этом расходы на отопление сокращаются в 8–10 раз по сравнению с традиционными кирпичными домами. При этом отопление домов начинается при более низкой температуре  $-2^{\circ}\text{C}$ , при более высокой температуре внешнего воздуха количество тепла, которое поступает от бытовых и осветительных приборов, а также от людей обеспечивает комфортные условия обитания.

Эффективность производства, транспорта энергии к потребителям и ее

использование отличается от западноевропейского уровня по всем трем показателям. Большая часть населения проживает в многоквартирных панельных домах, которые были построены в период низких цен на энергоносители. При этом существовали требования ускорения строительных работ, уменьшения стоимости и материалоемкости производства. Системы централизованного отопления не оснащены устройствами регулирования у потребителя и надежными системами выравнивания расходов теплоносителя, который приводит к значительной разнице тепловых потоков по отдельным зданиям [27,28].

Общая потребность домов в электрической и тепловой энергии оценивается на уровне 250–400 кВт·ч/м<sup>2</sup>, тогда как в странах Западной Европы среднегодовая величина составляет 150–230 кВт·ч/м<sup>2</sup>. В скандинавских странах дома имеют хорошую тепловую изоляцию, в результате среднегодовая потребность тепловой энергии составляет 120–150 кВт·ч/м<sup>2</sup>, в так называемых термодомах при тщательном выполнении тепловой изоляции затраты энергии составляют 60–80 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год.

Расходы энергоносителей зависят от тепловых потоков за счет перепада температур между внутренним и наружным воздухом. Потоки тепла идут через внешние ограждения (стены, потолок, пол, окна). Конечно же, интенсивность тепловых потоков зависит от конструкции, типа материалов и толщины ограждений. Решающим фактором, который влияет на тепловые расходы - есть разница температур внутри и снаружи дома.

В течение 2-х лет автором выполнено обследование расходов природного газа отдельными потребителями г. Кировограда (онкоцентр), г. Макеевка (микрорайон «Зеленый») и г. Горловки (частный сектор). Полученные данные приведены на рис. 2.1. При определении расходов теплоносителя для создания комфортных условий в помещении общая необходимая мощность источника теплоснабжения может быть определена по формуле

$$Q = q_v \cdot V_{\text{вн}} (t_{\text{вн}} - t_{\text{вн}}) \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (2.8)$$

где  $Q$  – общая мощность агрегата, необходимая для обогрева помещения, кВт;

$q_v$  – удельная тепловая мощность, Вт/м<sup>3</sup>·К;

$V_{\text{вн}}$  – внешний объем помещения,  $\text{м}^3$ ;

$t_{\text{втр}}$  – температура внутри помещения,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{вн}}$  – расчетная температура внешнего воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ .

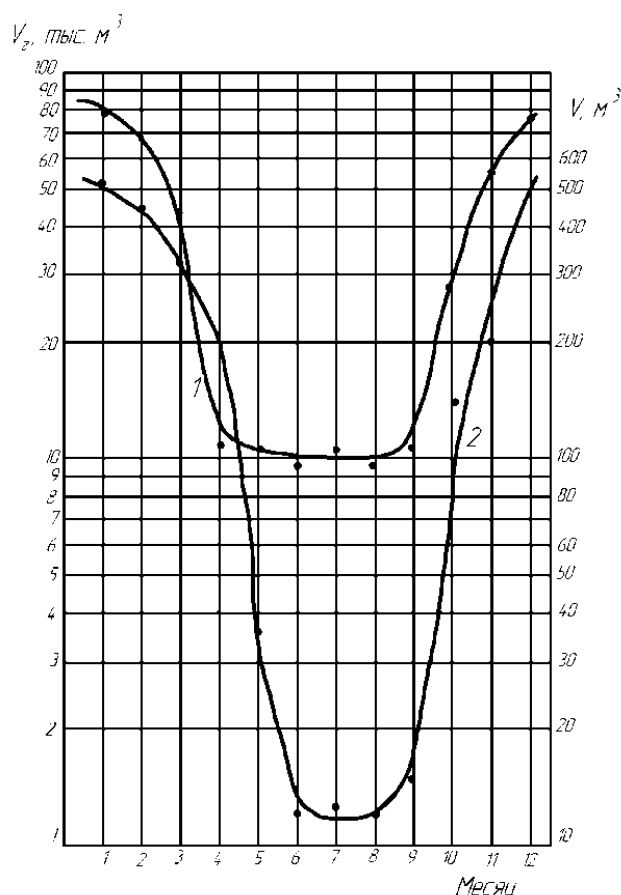


Рис. 2.1. Потребление тепловой энергии по месяцам:

1 – Кировоградский онкоцентр;

2 – частный жилой дом ( $V = 162 \text{ м}^3$ ,  $S = 60 \text{ м}^2$ ).

Температура  $t_{\text{вн}}$  выбирается в зависимости от климатической зоны.

Фактическое потребление природного газа по месяцам 2010 года для онкоцентра и частного жилого дома (соответственно, кривые 1 и 2 показано на рис. 2.1). Пиковый характер потребления в осеннезимние месяцы для частного дома (г. Горловка) имеет более острый характер. Для онкологического центра спад потребления природного газа в летние месяцы не столь острый, что обусловлено, по-видимому, наличием разбора горячей воды. Существует также некоторый сдвиг кривых снижения и увеличения потребления природного газа, что обусловлено климатическими особенностями регионов.

После обработки данных ДБН [29, 30] и компании VTS Clima [31] получены

аналитические зависимости, которые отображены на рис. 2.2.

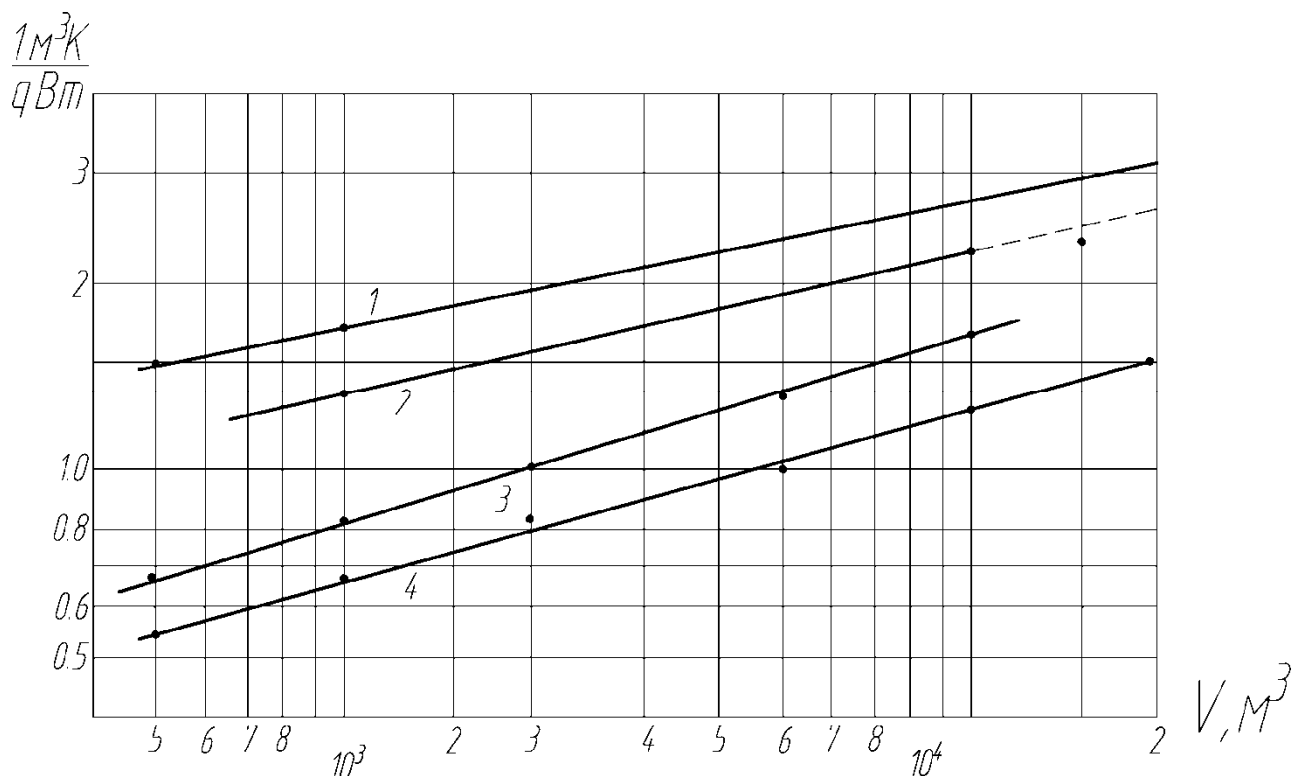


Рис. 2.2. Зависимость обратной величины удельной отопительной характеристики зданий  $1/q_0$ ,  $\text{м}^3 \text{ К/Вт}$ , от их наружного объема,  $V$ :

1 — здания, которые построены до 1958 г.,  $1/q = 0,42 \cdot V^{0,21}$ ;

2 — после 1958 г.,  $1/q = 0,27 \cdot V^{0,23}$ ;

3 — здания с поверхностью окон до 0,25 от общей наружной поверхности,  $1/q = 0,096 \cdot V^{0,31}$  (данные компании VTS Clima);

4 — здания с большими поверхностями окон,  $1/q = 0,095 \cdot V^{0,28}$  (данные компании VTS Clima).

Согласно строительным нормам и правилам существуют нормативные теплотери для жилых, общественных и административных зданий, лечебных и детских учебных заведений, дошкольных заведений и магазинов [29]. Нормативные характеристики приведены в приложении.

Как видно из приведенных данных удельные теплотери и, соответственно, затраты на теплоснабжение зависят от климатической зоны и этажности помещений вносит определенные неточности в расчетах в работе выполнена оценка теплотери от площади и от объема помещений в коммунальном секторе и в одном из лечебных учреждений при различном объеме помещений.

Анализ необходимой мощности для зданий микрорайона «Зеленый» (г.Макеевка) и онкоцентра (г.Кировоград) показал, что в логарифмических координатах линии идут эквидистантно.

Аналитические выражения для потребителей тепла:

- в микрорайоне «Зеленый»

$$Q = 5,23 \cdot 10^{-5} V^{0,91}, \text{ МВт} \cdot \text{ч/год}$$

- а для онкоцентра

$$Q = 3,93 \cdot 10^{-5} V^{0,91}, \text{ МВт} \cdot \text{ч/год}$$

Указанные зависимости показаны на рис. 2.3.

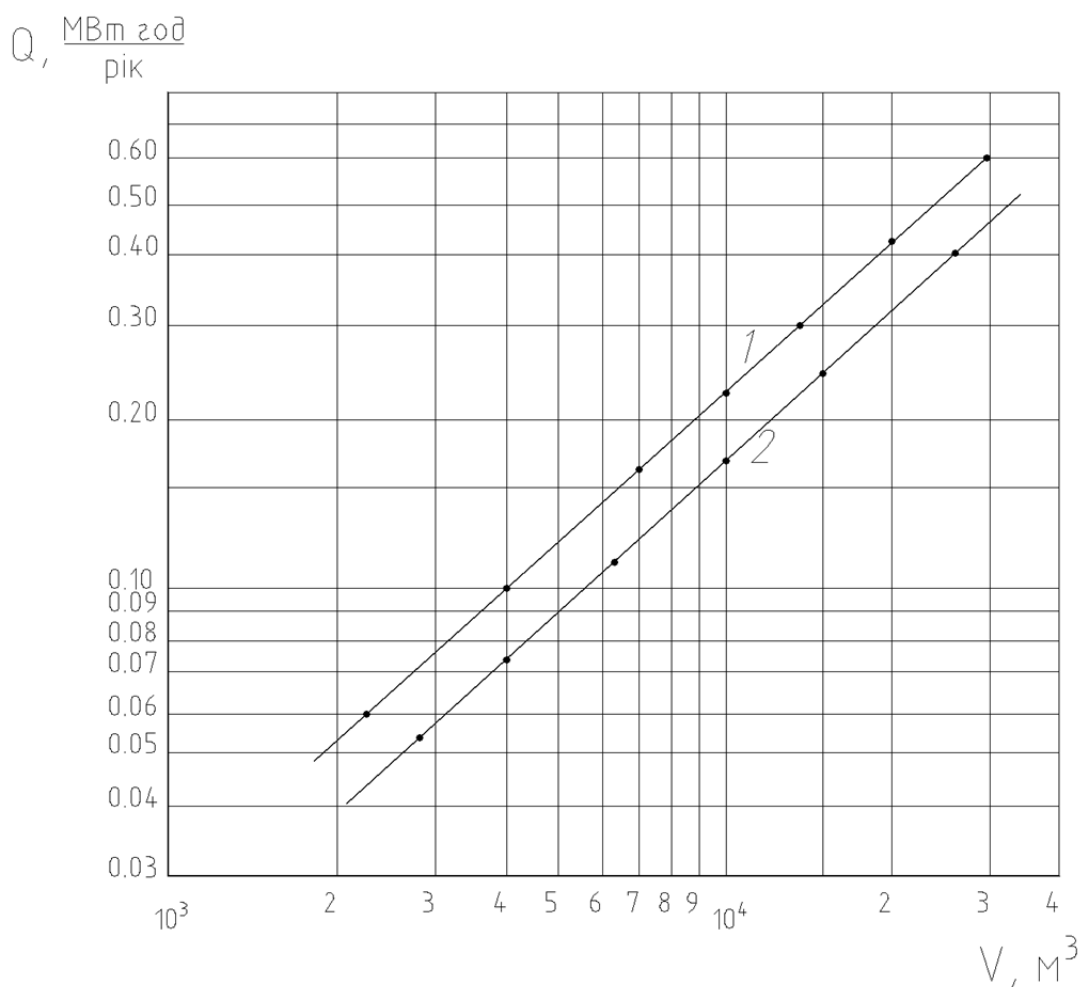


Рис. 2.3. Потребление теплоты  $Q$  в зависимости от объема помещений  $V$ :

1 – микрорайон «Зеленый» (г. Макеевка);

2 – онкоцентр (г. Кировоград).

Сравнение данных удельного потребления тепла по VTS Clima и полученным автором данных показывает, что общее потребление тепла пропорционально объема здания «V» в степени 0,91, а по данным VTS Clima «V» в степени 0,69-0,72. Очевидно, это обусловлено тем, что данные указанной компании приведены для зданий с более качественной тепловой изоляцией. Следует отметить, что по нормам расходы тепла также пропорциональны объему зданий в степени 0,77-0,79. Таким образом, имеет место существенное различие между нормированными расходами тепла согласно и фактическими значениями, а также данными компании VTS Clima.

Пиковый характер потребления тепла в зимние месяцы, особенно для частных владельцев зданий свидетельствует о целесообразности аккумулирования тепловой энергии в летние месяцы, например, в подземных горизонтах и использования ее зимой с «перекачкой» тепла с применением тепловых насосов.

В умеренном климате в хорошо изолированных домах тепловые насосы обеспечивают необходимый отпуск тепла. Большинство тепловых насосов работают при температуре теплоносителя – подогретой воды 55 °С, хотя в некоторых случаях возможная эксплуатация при температуре до 65 °С. При этом используются стандартные схемы теплоснабжения. В умеренном климате в хорошо изолированных домах тепловые насосы обеспечивают необходимый отпуск тепла. Большинство тепловых насосов работают при температуре теплоносителя – подогретой воды 55 °С, хотя в некоторых случаях возможная эксплуатация при температуре до 65 °С. При этом используются стандартные схемы теплоснабжения. В критических условиях при значительной длительности низких температур (что для Украины не является типичным) устанавливаются дополнительные источники подогрева, или размещения источников обогрева помещения под полом.

Выводы по разделу:

1. Выполненный анализ потребления природного газа в коммунальном хозяйстве показал, что основной расход газа идет на отопление помещений.

2. Удельный расход природного газа на отопление по европейским данным обратнопропорционален объему зданий в степени 0,3.
3. Анализ потребления природного газа по 3-м городам Украины показал, что оно пропорционально объему зданий в степени 0,9.
4. Использование горячего водоснабжения существенно «сглаживает» пиковый характер потребления газа.

### РАЗДЕЛ 3

## СНИЖЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ

### 3.1 Обзор исследований по генерации тепла в конденсационных теплогенераторах

Современные теплогенерирующие установки работают в основном на природном газе. Они имеют сравнительно хорошие технико-экономические показатели. При сжигании природного газа практически отсутствуют потери теплоты из-за механической и химической неполноты сгорания, потери тепла в окружающую среду также небольшая. Однако, при номинальной нагрузке водогрейных котлов температура уходящих дымовых газов составляет 140-160 °С. Кроме того, в результате известной реакции горения основного компонента природного газа метана, на каждый моль метана образуется два моля паров воды.

Снижение температуры уходящих газов и использование скрытой теплоты парообразования за счет охлаждения уходящих дымовых газов до температуры ниже точки росы является значительным источником энергосбережения.

При охлаждении дымовых газов существенно уменьшается объем отходящих газов и затраты энергии на работу дымососов (при их наличии). Снижение температуры уходящих газов на 2-4 °С обеспечивает увеличение коэффициента использования топлива на 1%. Неблагоприятными факторами глубокого захлаживания дымовых газов является возможность конденсации паров воды в наружных газоходах и дымовой трубе.

Важным обстоятельством благоприятно влияющим на использование конденсационных котлов является улучшение экологических показателей работы котлов, а именно снижение эмиссии парниковых газов и  $\text{NO}_x$ .

Согласно данных исследований зарубежных ученых, основное внимание к эмиссии углекислого газа, обуславливающего парниковый эффект, несколько преувеличено, так как вклад паров воды в парниковый эффект составляет 60-65%, а углекислого газа 25-27%.



Снижение эмиссии паров воды может быть достигнуто за счет повышения коэффициента полезного действия (КПД) при генерации как тепловой, так и электрической энергии. Наиболее высокий, при генерации тепловой энергии, КПД достигается при непосредственном контакте дымовых газов и орошающей воды. Непосредственный контакт достигается за счет подачи орошающей воды на насадку из колец Рашига, седел Берли или типа Инталлокс. Однако при этом отсутствуют детальные исследования влияния типа насадки, плотности орошения, КПД теплогенераторов и экологических показателей: содержание  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  и паров воды в дымовых газах после теплогенератора. Кроме этого, необходимо изучение процессов тепло- и массообменов, а также остаточного содержания углекислого газа в орошающей воде после ее подогрева.

В Советском Союзе в 1978 году были проведены испытания крупного контактного экономайзера для утилизации тепла дымовых газов котла на Московской ГЭС-1 [32]. Температура дымовых газов после контактных экономайзеров поддерживалась за счет байпасирования потока газов мимо экономайзера. Наибольшая производительность экономайзера 8 Гкал/ч была достигнута в зимнее время при начальной температуре воды 2 °С и конечной 38 °С. Экономайзер подключался к напорной стороне дымососа. Подогретая вода использовалась для подачи на химводоочистку. Затраты на установку окупились за 4 месяца.

Испытания экономайзеров на Первоуральской ТЭЦ позволили установить влияние нагрузки котлов на производительность экономайзера. При увеличении паровой нагрузки котла с 50 до 70 т/ч (на 40%) теплопроизводительность экономайзера повысилась с 2,6 до 4,7 Гкал/ч (на 80%). Испытания на Челябинской ГРЭС показали, что производительность контактных экономайзеров существенно зависит от температуры поступающей воды. Снижение температуры заметно увеличивает теплопроизводительность экономайзера.

В работе Семенюка Л.Г. [33] описан опыт использования контактных экономайзеров на ряде предприятий Украины (Бердической ТЭЦ, Киевской ТЭС-1).

В работах отмечены существенные недостатки контактных экономайзеров: относительно низкая температура нагрева воды и насыщение воды углекислым газом, что повышает ее агрессивность. Отмечается, что для нагрева воды до более высокой температуры необходимо применение промежуточного теплоносителя водного раствора бромистого лития или менее дефицитного хлористого кальция. Растворы этих солей имеют более высокую температуру кипения, точку росы и температуру мокрого термометра.

В зарубежных странах также уделяется большое внимание экономии топлива за счет утилизации тепла дымовых газов, например, в Федеративной Республике Германии (ФРГ) используется контактный подогреватель воды на котлах, работающих на твердом топливе. При этом утилизатор тепла работает одновременно и пылезолоуловителем.

Во Франции и ФРГ эксплуатируются контактно-поверхностные подогреватели «ИКСО». Подогреватели представляют собой противоточные аппараты с перетоками подогреваемой воды с полки на полку. В Бельгии используют контактные экономайзеры «ИННОТЕКС», которые подогревают воду и воздух. За счет повышения влагосодержания воздуха установка обеспечивает работоспособность при более высокой температуре оборотной воды (70 °С, вместо обычной 50 °С). При этом на газовом котле обеспечивается экономия природного газа 15%.

Сравнение конденсационных и традиционных котлов показывает, что КПД первых выше на 15-20%. Однако кроме отмеченных выше недостатков, указывают на существенное повышение аэродинамического сопротивления газового тракта и необходимость изготовления утилизаторов тепла из коррозионно-стойких материалов, поскольку рН конденсата составляет от 3 до 5 единиц. При непосредственном контакте оборотной воды с дымовыми газами (без промежуточного теплообменника) рН существенно выше (4,5-5,5), однако при этом также необходимо применение антикоррозионных мероприятий.

### 3.2 Конструктивные и технологические решения при выполнении конденсационных теплоутилизаторов

В настоящее время находят применение насадочные и противоточные теплоутилизаторы двух типов: блочные контактные экономайзеры ЭК-5М1 и контактно-поверхностные экономайзерные агрегаты АЭМ-06. Непосредственно для целей теплоснабжения используются водогрейные котлы, оборудованные контактными насадками разных типов.

В контактных аппаратах используется тепло- и массообменная насадка из колец Рашига, седел Берли или типа Инталлокс. Схема блочного контактного экономайзера показана на рис. 3.1.

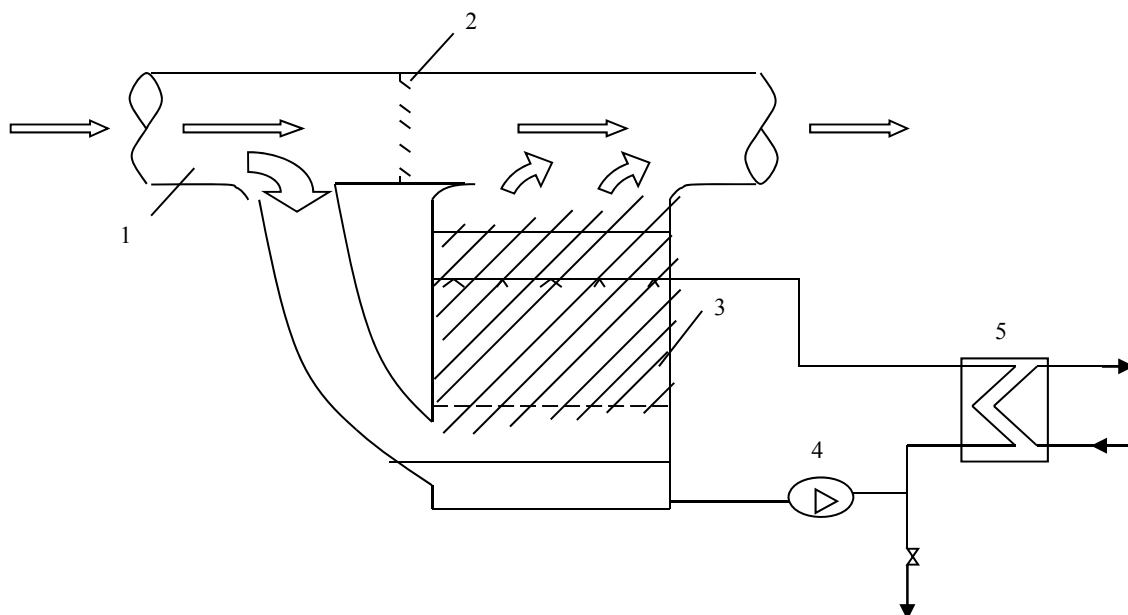


Рис. 3.1. Схема утилизации тепла дымовых газов при сжигании в котлах природного газа

- 1 – дымоход;
- 2 – шибер;
- 3 – контактный экономайзер;
- 4 – циркуляционный насос;
- 5 – поверхностный подогреватель.

Подогреваемая вода подается в экономайзер через водораспределитель, расположенный в верхней части аппарата. Он представляет собой круглый коллектор с восемью радиально расположенными горизонтальными перфорированными трубами, которые подсоединены к коллектору. Диаметр отверстий в трубах 5 мм, шаг между отверстиями 50 мм.

Утилизатор оборудован поддерживающей решеткой, на которую навалом загружена насадка из колец Рашига. Дымовые газы от котла подводятся под слой насадки. Вода после распределительного коллектора стекает по насадке. Учитывая высокую удельную поверхность насадки (приблизительно  $200 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ), обеспечивается интенсивный теплообмен между газами и насадкой. Поверхность теплообмена зависит от равномерности смачивания всей насадки. Охлажденные дымовые газы отводятся из верхней части аппарата, а нагретая вода отводится из нижней части аппарата через гидрозатвор.

Для обеспечения устойчивого движения дымовых газов через контактный экономайзер используют принудительную тягу. Скорость дымовых газов в контактном экономайзере поддерживают 2-2,5 м/с. Высота рабочего слоя насадки составляет 1000-1200 мм.

Недостатком насадочных контактных аппаратов является насыщение воды углекислым газом. В некоторых образцах аппаратов применяют встроенные декарбонизаторы. При этом вода, протекающая через слой насадки, в которой происходит ее нагрев самотеком поступает на следующую насадку, на которой за счет продувки воздуха происходит удаление углекислого газа. Однако при этом происходит насыщение воды кислородом, что также создает дополнительные коррозионные проблемы. Для устранения коррозионных ограничений, связанных с насыщением воды агрессивными газами ( $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ ), а при работе котлов на мазуте и с поглощением диоксида серы и значительным снижением pH воды применяют двухконтурный нагрев воды с установкой промежуточных теплообменников, выполненных из коррозионно-стойких материалов.

Одним из решений утилизации скрытой теплоты продуктов сгорания природного газа является применение контактных теплоутилизаторов (КТУ) для подогрева воздуха в контактных воздухоподогревателях (КВП).

Расположение двух аппаратов (КВП и КТУ) в одном корпусе один над другим упрощает работу циркуляционного контура и снижает потребность в площадях для установки теплообменников, что особенно важно в условиях стесненной компоновки современных котельных. В схеме установки исключен декарбонизатор, так как декарбонизация воды происходит в КВП при непосредственном контакте с дутьевым воздухом.

Наличие промежуточного теплообменника обеспечивает высокое качество нагреваемой воды внешних потребителей и подачу ее потребителям без разрыва струи. Количество выделяющегося из продуктов сгорания в КТУ конденсата обычно превышает потребление воды в КВП для увлажнения дутьевого воздуха.

Существенное упрощение технологии получения подогретой воды для отопления реализовано в котлах СВТ (Рис. 3.2). В указанных котлах для исключения насыщения подогреваемой воды углекислым газом осуществлен двухконтурный подогрев воды: в первом контуре часть потока направляется через насадку, на которой подогревается до температуры близкой к  $100^{\circ}\text{C}$ , а другая часть потока во втором контуре проходит по кольцевому зазору и смешивается с водой, подогретой в первом контуре в нижней части в аккумуляторном баке.

Регулирование температуры воды поступающей в теплосеть осуществляется за счет байпасирования части потока через кольцевую «рубашку» вокруг основной теплообменной зоны котла.

Процессы отбора тепла от дымовых газов в поверхностных и контактных аппаратах существенно отличаются. В прил. Б представлена зависимость теплосодержания от влагосодержания и температуры при охлаждении газов в поверхностных и контактных аппаратах при их работе в противоточном и прямоточном режимах. В поверхностном аппарате охлаждение происходит в начальный период при постоянном влагосодержании ( $d = \text{const}$ ).

После того, как относительная влажность газов достигнет 100%-ой величины начинается процесс осушения газов за счет конденсации водяных паров. Точка  $k$ , которая лежит на пересечении прямой  $d = \text{const}$  и граничной кривой  $\phi = 100\%$  обозначается как точка росы. Конденсация водяных паров начинается только после охлаждения газов до точки росы.

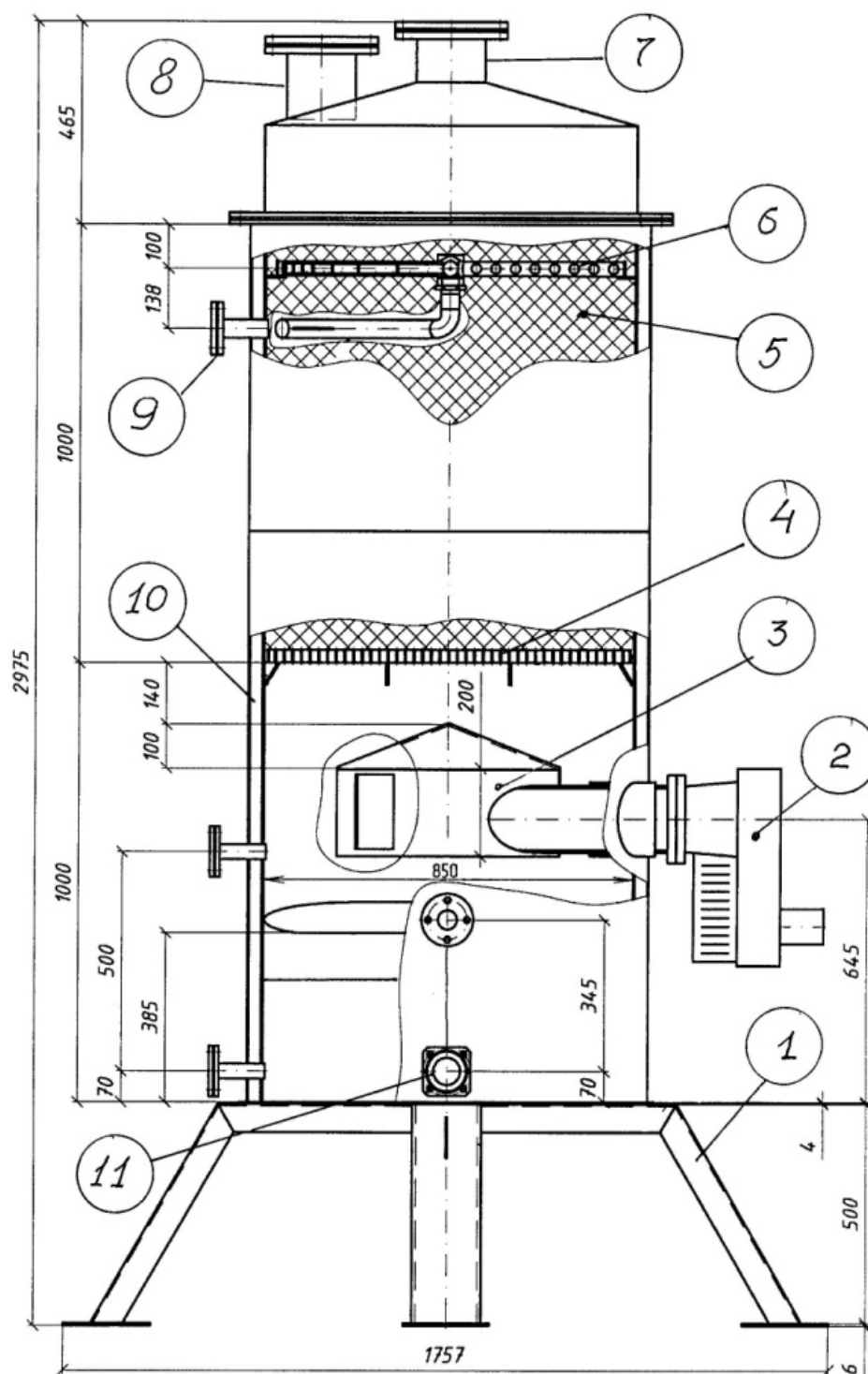


Рис. 3.2. Водогрейный котел СВТ

1 – Опора; 2 – Горелочное устройство; 3 – Камера сгорания; 4 – Поддерживающая решетка; 5 – Насадка из колец Рашига; 6 – Распределительное устройство для подачи подогретой воды; 7 – Штуцер отвода дымовых газов; 8 – Штуцер с противовзрывной мембраной; 9 – Штуцер подвода подогретой воды; 10 – Кольцевой зазор байпасного потока воды; 11 – Штуцер отвода подогретой воды.

Механизм теплообмена в котле существенно сложнее в результате того, что подогретая вода в нижней части насадки контактирует с высокотемпературными газами, что сопровождается испарением части воды и по мере движения газов в верхнюю часть насадки происходит как конденсация паров воды, полученных в процессе сгорания топлива, так и паров, полученных в результате испарения части воды внизу насадки.

При температуре воды, равной точке росы  $v_p$ , парциальное давление паров воды в газах и у поверхности воды равны. При  $v > v_p$  парциальное давление водяных паров у поверхности воды больше, чем в газах, что и вызывает увлажнение газов и испарение воды.

Осушение дымовых газов идет тем интенсивнее и глубже, чем ниже начальная температура воды и больше ее количество, приходящееся на 1 кг газов. Конденсации водяных паров и интенсификация переноса тепла на развитой поверхности массо- и теплообменной насадки являются основным преимуществом и основным резервом повышения экономичности данных котлов.

«Стоимость» каждого градуса охлаждения дымовых газов тем больше, чем больше влажность дымовых газов. При этом по данным Аронова И.З., [6] если для повышения коэффициента используемого топлива ( $K_{ИТ}$ ) на 1 % в установках без конденсации паров нужно заохладить дымовые газы на 15-20°C, то при конденсации паров воды для такого же повышения  $K_{ИТ}$  достаточно снизить температуру газов всего на 2-3 °C.

Следует отметить, что даже при отсутствии конденсации водяных паров развитая поверхность насадки ( $204 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ) обеспечивает существенное увеличение отбора тепла от продуктов сгорания природного газа.

Влагосодержание продуктов сгорания для природного газа, получаемого из России, зависит в основном от коэффициента избытка воздуха в дымовых газах «d» и от влагосодержания дутьевого воздуха  $d_v$ . При влагосодержании воздуха  $d_v = 10 \text{ г/кг}$  автором получена зависимость (Рис. 3.3)

$$d_g = 4,51 \exp(0,06 \cdot t), \quad (3.1)$$

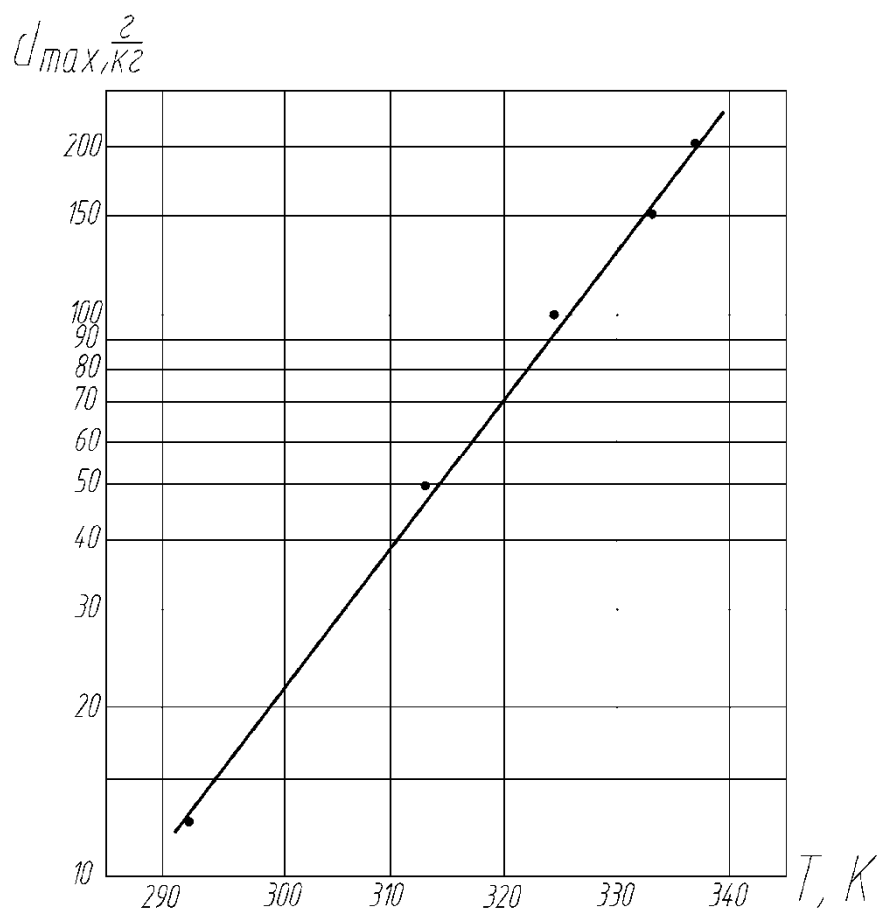


Рис. 3.3. Зависимость содержания влаги в дымовых газах,  $d_{max}$  (при 100% относительной влажности) от абсолютной температуры,  $T$ ,  $d=1,68 \cdot 10^{-7} \exp(0,062T)$

С другой стороны, влагосодержание дымовых газов может быть рассчитано из выражения, полученного в [25]:

$$d = (1000 + 8\alpha \cdot d_g)(7,83x - 0,83). \quad (3.2)$$

Если в процессе охлаждения дымовых газов они становятся насыщенными, то процесс изменения равновесия происходит по  $\phi = 100\%$  и влагосодержание можно определить по эмпирической формуле Л. Г. Семенюка [33]

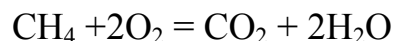
$$d_{yx} = (0,64 + 4\alpha_{yx}) \exp[6,2 \cdot 10^{-2} \cdot t_{yx} / (0,199 + \alpha_{yx})]. \quad (3.3)$$

Таким образом,  $\Delta d_{yx}$  определяет степень конденсации водяных паров и, соответствующий прирост величины КИТ за счет конденсации водяных паров.

Как уже отмечено выше, повышение КПД за счет этого является только частью общего повышения КИТ за счет интенсификации процессов теплообмена на массообменной насадке.



При сжигании в топках котлов природного газа по реакции



на каждый  $\text{м}^3$  сгораемого природного газа образуется 1,607 кг паров воды. При конденсации паров воды утилизируется скрытая теплота парообразования, в результате чего отбор тепла от сгораемого топлива увеличивается на 4,29 МДж/ $\text{м}^3$ . Вследствие этого расход природного газа сокращается на 12,8% (при теплотворной способности природного газа 33,49 МДж/ $\text{м}^3$ ). С учетом конвективного теплообмена степень утилизации тепла дымовых газов (т.е. эффективности использования топлива) увеличивается на 15–20% (в зависимости от температуры орошающей воды).

Следует учитывать, что степень конденсации паров воды из дымовых газов зависит от температуры точки росы, при которой начинается конденсация. Последняя, существенно зависит от содержания углекислого газа в дымовых газах. На рис. 3.4 показана полученная зависимость между содержанием  $\text{CO}_2$  и обратной величиной абсолютной температуры по данным [6], обработанным в этой работе.

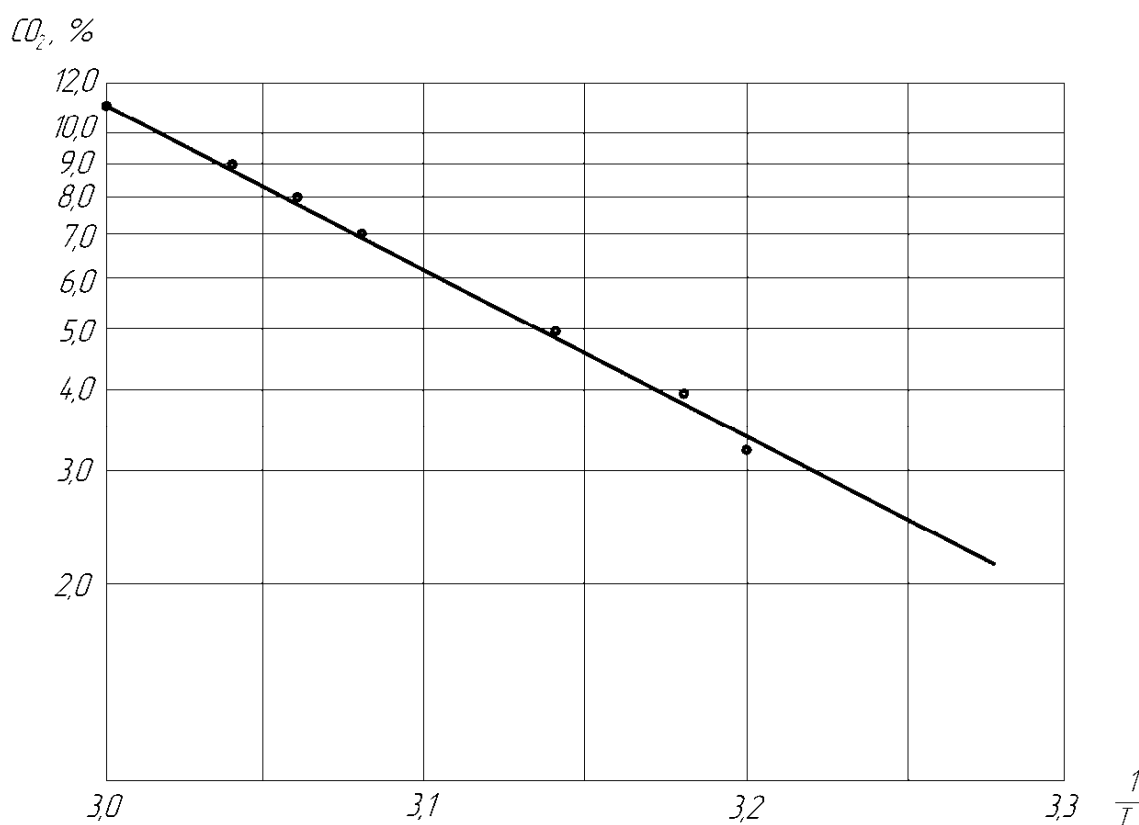


Рис. 3.4. Зависимость между содержанием  $\text{CO}_2$  и обратной величиной абсолютной температуры точки росы,  $1/T$ .

Учитывая то, что расчет КПД установок рассчитывают по низшей теплоте сгорания, в конденсационных котлах используется вся низшая теплота сгорания (100%) плюс теплота конденсации водяного пара (8–9%). Противоречие законам сохранения энергии устраняется, если расчет вести по высшей теплоте сгорания топлива.

### 3.3 Выбор конструктивных характеристик конденсационных котлов

Основными конструктивными параметрами конденсационного котла являются его диаметр, высота и тип насадки.

При выборе диаметра водогрейного котла с непосредственным контактом дымовых газов с подогреваемой водой исходили из следующих соображений. Учитывая то, что  $\rho_v \gg \rho_g$ , находили фиктивную скорость газа  $W_3$  в точке захлебывания (инверсии) по формуле [34,35]

$$\lg \left( \frac{W_3^2 \cdot \sigma \cdot \rho_g \cdot \mu_{ж}^{0,16}}{g \cdot V_{св}^3 \cdot \rho_{ж}} \right) = A - 1,75 \left( \frac{L}{G} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{\rho_g}{\rho_{ж}} \right)^{0,25}, \quad (3.4)$$

где  $\sigma$  – удельная поверхность насадки,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$V_{св}$  – свободный объем насадки,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$\rho_g, \rho_{ж}$  – плотности газа и жидкости,  $\text{кг}/\text{дм}^3$ ;

$\mu_{ж}$  – динамический коэффициент вязкости жидкости,  $\text{мПа} \cdot \text{с}$ ;

$L, G$  – соответственно, массовые расходы жидкости и газа,  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$A = 0,022$  – эмпирический коэффициент для насадки из колец.

В качестве насадки использовались керамические кольца 25x25x3. Основные характеристики такой насадки  $V_{св} = 0,74 \text{ м}^3/\text{м}^3$  и  $\sigma = 204 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Средняя по высоте насадки температура находилась как среднее логарифмическое  $\sqrt{t_{max} \cdot t_{min}} = \sqrt{800 \cdot 60} \approx 220 \text{ }^\circ\text{C}$ . Средняя температура воды определялась таким же образом и составляла  $\sqrt{50 \cdot 98} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для указанных температур основные физические параметры показаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Основные физические параметры различных сред

Среда	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Вязкость $\mu$ , Па·с·10 <sup>5</sup>
Дымовые газы (t=220°C)	0,735	2,6
Вода (t=70°C)	980	40,5

При условии подачи на насадку 60% от общего потока воды (40% подается по кольцевому каналу), т.е. расхода воды 6,5 т/ч, подставляя данные в указанное уравнение получаем:

$$\begin{aligned}
 & \lg \frac{W_3^2 \cdot 204 \cdot 0,735 (4,05 \cdot 10^{-4})^{0,16}}{9,8 \cdot 0,40 \cdot 980} = \\
 & = 0,022 - 1,75 \left( \frac{6500}{30,5 \cdot 10,5 \cdot 0,735} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{0,735}{980} \right)^{0,125} \\
 & \lg \frac{W_3^2 \cdot 204 \cdot 0,29}{9,8 \cdot 0,40 \cdot 980} = 0,022 - 1,75 (2,29 \cdot 0,407) = -1,61 \\
 & W_3 \cdot 0,011 = 0,024; \quad W_3 = 1,48 \text{ м/с.}
 \end{aligned}$$

Для исключения «подвисания» жидкости в потоке газа обычно принимают  $W_r = 0,75W_3$ . Соответственно, можно принять  $W_r = 1,11$  м/с.

Учитывая то, что водогрейный котел предполагалось подключать без дымососа рабочая скорость газа принята 0,35 м/с

$$W_r = \frac{V_r \cdot K_B}{3600(1 - \varepsilon)} = \frac{30,5 \cdot 10,5}{3600(1 - 0,74)} = 0,35 \text{ м/с}$$

где  $V_r$  – расход природного газа, м<sup>3</sup>/ч;

$K_B$  – коэффициент перерасчета расхода природного газа в расход дымовых газов;

$\varepsilon$  – доля свободного объема в насадке, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

### 3.4 Определение возможности исключения дымососа из технологической схемы подогрева воды

Исключение дымососа из технологической схемы подогрева воды объясняется следующим. При децентрализованном теплоснабжении предполагается возможность установки данных котлов на крышах зданий,

установка дымососов создает ряд неудобств для жителей верхних этажей. При этом обеспечивается более надежная эксплуатация с точки зрения техники безопасности и исключается проблема «запаривания» насосов подачи горячей воды – гидроударов при высоких температурах подогрева воды.

При определении перепада давления дымового газа на единицу высоты аппарата в двухфазном потоке находим следующим образом. Перепад давления зависит от сопротивления движения газовой фазы и от дополнительного напора, который должен предопределять газовый поток для компенсации трения жидкости. Уравнение, характеризующее потерю напора на каждый метр насадки, имеет вид:

$$\left(\frac{\Delta P}{l}\right)_{г.ж} = \xi_{г} \frac{W_{г}^2 \cdot \rho_{г}}{2gd_{эг}} + \xi_{ж} \frac{W_{ж}^2 \cdot \rho_{ж}}{2gd_{эж}}, \quad (3.5)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления, кг/м<sup>2</sup>;

$l$  – высота насадки, м;

$\xi_{г}, \xi_{ж}$  – коэффициент сопротивления, соответственно, газов и жидкости;

$W_{г}, W_{ж}$  – скорость газа и жидкости, м<sup>3</sup>/с;

$d_{эг}, d_{эж}$  – эквивалентная толщина пленки газа и жидкости, м;

$\rho_{г}, \rho_{ж}$  – плотности газа и жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

При доле сечения занятого жидкостью  $\varepsilon$ , доля занятая газовой фазой составит  $1 - \varepsilon$ .

Линейная скорость движения жидкости составит

$$W_{ж} = \frac{L}{\rho_{ж} \cdot \varepsilon} = \frac{1,94}{0,74 \cdot 980} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}, \quad (3.6)$$

где  $L$  – массовый расход жидкости, кг/с.

Линейная скорость газа

$$W_{г} = \frac{G \cdot K}{(1 - \varepsilon) \cdot 3600} = \frac{30,5 \cdot 10,5}{(1 - 0,74) \cdot 3600} = 0,35 \text{ м/с}. \quad (3.7)$$

Эквивалентные диаметры (толщина пленки) для газового и жидкого потока:

$$d_{эг} = \frac{4(1 - \varepsilon)}{\sigma} = \frac{4 \cdot 0,26}{204} = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad (3.8)$$

$$d_{\text{эж}} = \frac{4 \cdot 0,74}{204} = 1,45 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

При соотношении перепада давления в двухфазном потоке газ-жидкость к перепаду давления в газовом потоке получим

$$\frac{(\Delta P/l)_{\Gamma-\text{ж}}}{(\Delta P/l)_{\Gamma}} = 1 + \frac{\varphi_{\text{ж}}}{\varphi_{\Gamma}} \left( \frac{W_{\text{ж}}}{W_{\Gamma}} \right)^2 \left( \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\Gamma}} \right) \left( \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right). \quad (3.9)$$

Для потока жидкости критерий Рейнольдса

$$Re_{\text{ж}} = \frac{W_{\text{ж}} \cdot d_{\text{эж}} \cdot \rho_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}} = \frac{2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,45 \cdot 10^{-2} \cdot 980}{4,05 \cdot 10^{-4}} = 95,0 \quad (3.10)$$

и газового потока:

$$Re_{\Gamma} = \frac{W_{\Gamma} \cdot d_{\text{эж}} \cdot \rho_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}} = \frac{0,35 \cdot 5,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,735}{2,6 \cdot 10^{-5}} = 50,46. \quad (3.11)$$

Коэффициенты сопротивления в общем виде могут быть представлены следующими уравнениями:

для жидкости:

$$\xi_{\text{ж}} = \frac{C}{\left( \frac{4L}{Sg\mu_{\text{ж}}} \right)^m}. \quad (3.12)$$

и для газового потока:

$$\xi_{\Gamma} = \frac{C}{\left( \frac{4G}{Sg\mu_{\Gamma}} \right)^m}. \quad (3.13)$$

Подставляя указанные значения в уравнение (9) получим

$$B = \frac{(\Delta P/l)_{\Gamma-\text{ж}}}{(\Delta P/l)_{\Gamma}} = 1 + \left( \frac{L}{G} \right)^{2-m} \left( \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^m \left( \frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\Gamma}} \right)^m \left( \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^3. \quad (3.14)$$

Учитывая ламинарный поток движения газа и жидкости в насадке, значение  $m$  может быть принято равным 1.

При этом

$$\begin{aligned} B &= 1 + \left( \frac{6500}{30,5 \cdot 10,5 \cdot 0,735} \right) \left( \frac{0,735}{980} \right) \left( \frac{40,5}{2,6} \right) \left( \frac{1-0,74}{0,74} \right)^3 = \\ &= 1 + 27,6 \cdot 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot 15,57 \cdot 4,3 \cdot 10^{-2} = 1,01. \end{aligned}$$

Таким образом, в принятом режиме перепад давления практически не отличается от части газового потока и котел может работать без установки дымососа.

В условиях развитой турбулентности  $m \rightarrow 0$ .

В этом случае

$$v = 1 + \left(\frac{L}{G}\right)^2 \cdot \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}\right)^3 = 1 + 761,8 \cdot 0,043 \approx 34$$

Увеличение плотности орошения и, соответственно, расхода природного газа обеспечивают форсирование нагрузки котла. В этом случае для устойчивого режима его эксплуатации требуется подключение котла к дымососу.

### 3.5 Влияние захлаживания продуктов сгорания на теплоотдачу к подогреваемой воде

Измерения температуры продуктов сгорания в камере сгорания после их захлаживания под распределительной решеткой показали, что уровни температур составляют  $1950 \pm 50^\circ\text{C}$  и  $1000 \pm 50^\circ\text{C}$ .

Теплоемкость компонентов дымовых газов при температурах 2000 и 1000 °C представлена в таблице 3.2.

**Таблица 3.2 - Теплоемкость компонентов дымовых газов**

	Теплоемкость, кДж/нм <sup>3</sup> , °C			
Компонента	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>
Температура, °C				
2000	1,48	2,44	1,96	1,57
1000	1,39	2,21	1,72	1,48

Объем компонентов в продуктах сгорания природного газа при теоретическом количестве воздуха  $V^0 = 9,81 \text{ нм}^3/\text{нм}^3$ , определяют по известным формулам [6].

Объем азота

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_0 + \frac{N_2}{100} = 0,79 \cdot 8,83 + \frac{9,3}{100} = 7,07 \text{ нм}^3/\text{нм}^3.$$

Объем трехатомных газов

$$V_{R_2O} = 0,01 \cdot (0,3 + 88 + 2 \cdot 1,9 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,3) = 0,94 \text{ нм}^3/\text{нм}^3.$$

Теоретический объем водяных паров

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \cdot (2 \cdot 88 + 0,124 \cdot 10,06 + 1,9 + 1,5 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,3) = 1,8 \text{ нм}^3/\text{нм}^3.$$

Доля каждого газа в смеси дымовых газов

$$N_2 = \frac{7,07}{7,07 + 0,94 + 1,8} = 0,721;$$

$$CO_2 = \frac{0,94}{9,81} = 0,096;$$

$$H_2O = \frac{1,8}{9,81} = 0,183.$$

Теплоемкость газов при 2000 °С

$$\bar{C} = 1,48 \cdot 0,721 + 2,44 \cdot 0,096 + 1,96 \cdot 0,183 = 1,66, \text{ кДж/нм}^3 \cdot ^\circ\text{С}.$$

Теплоемкость газов при температуре 1000 °С с учетом испарения части воды

$$\bar{C} = \frac{7,07 \cdot 1,39}{9,81 + 1,725q} + \frac{0,94 \cdot 2,21}{9,81 + 1,725q} + \frac{(1,8 + 1,725q) \cdot 1,72}{9,81 + 1,725q}, \text{ кДж/нм}^3 \cdot ^\circ\text{С}.$$

Тепловой баланс над камерой горения (под распределительной решеткой)

$$V_z \cdot C_T \cdot t_z - V_{0z} \cdot C_{0T} \cdot t_{0z} = q \cdot r;$$

$$9,81 \cdot 1,66 \cdot 2000 - (9,81 + 1,725q) \left[ \frac{7,07 \cdot 1,39}{9,81 + 1,725q} + \frac{0,94 \cdot 2,21}{9,81 + 1,725q} + \frac{(1,8 + 1,725q) \cdot 1,72}{9,81 + 1,725q} \right] \cdot 1000 = q \cdot 540;$$

$$17568,3 = 3507 \cdot q;$$

$$q = 5,009 \text{ кг/нм}^3.$$

При сжигании 30 м<sup>3</sup>/ч природного газа количество испарившейся воды по тепловому балансу составит 150 кг/ч. Влажность газов увеличивается в 3,1 раза (с 18,3 до 56,6 %).

Конденсация паров воды увеличивает коэффициент теплоотдачи от продуктов горения углеродного газа. При этом коэффициент теплоотдачи

увеличивается пропорционально доли паров воды более чем в 15,6 раз. На рис. 3.5 показано влияние доли неконденсирующихся газов «ε» на соотношение коэффициента теплоотдачи смеси паров воды с неконденсирующимися продуктами горения «α<sub>см</sub>» к коэффициенту теплоотдачи паров воды «α». Аналитическая зависимость, описывающая в пределах уменьшения доли неконденсирующихся газов от 0,1 до 0,8 с коэффициентом корреляции R<sup>2</sup> > 0,98 описывается уравнением:

$$\frac{\alpha_{см}}{\alpha} = 0,66 \cdot \exp(-4,58\varepsilon)$$

Зависимость получена путем обработки экспериментальных данных, полученных в работе [7] (Рис.3.5).

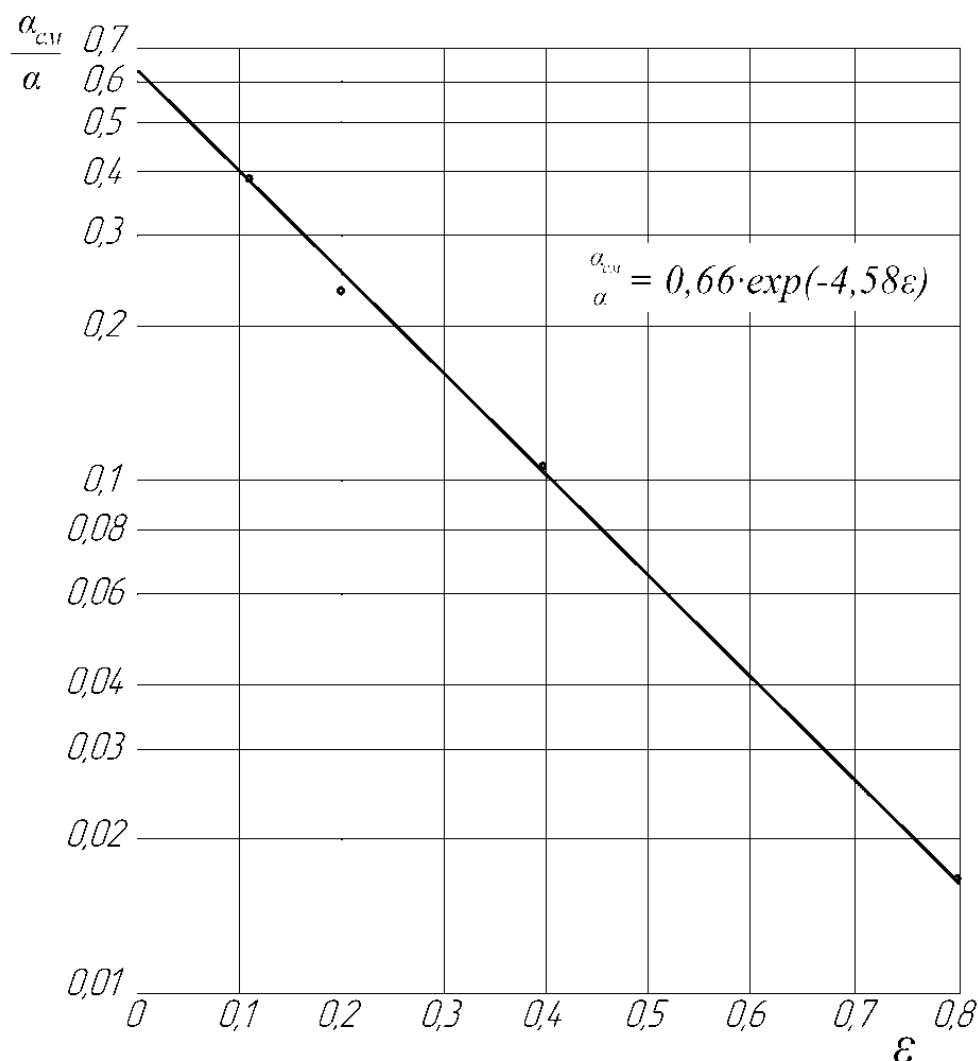


Рис. 3.5. Зависимость соотношения коэффициентов теплоотдачи смеси неконденсирующихся газов и паров воды  $\alpha_{см}/\alpha$ , и коэффициента теплоотдачи паров воды от доли неконденсирующихся газов, ε



Использование контактных аппаратов, загруженных массо- и теплообменной насадкой с удельной поверхностью до  $200\text{ м}^2/\text{м}^3$  позволяет значительно интенсифицировать процессы переноса тепла и сократить расходы топлива как на существующих котельных при установке в них контактных экономайзеров так и на вновь сооружаемых котельных при установке контактных водонагревателей серии СВТ.

Степень конденсации паров воды и, соответственно, коэффициент использования топлива ( $K_{\text{ит}}$ ) котла, зависит от температуры воды, которая орошает насадку и нагрузку котельной установки. На рис. 3.6 и 3.7 показана зависимость  $K_{\text{ит}}$  котла от указанных показателей его работы.

Как видно, из представленных данных, основное влияние на  $K_{\text{ит}}$  осуществляет температура циркулирующей воды. Однако, даже при повышенной температуре циркулирующей воды  $K_{\text{ит}}$  котла существенно повышается за счет увеличения поверхности контакта дымовых газов с водой.

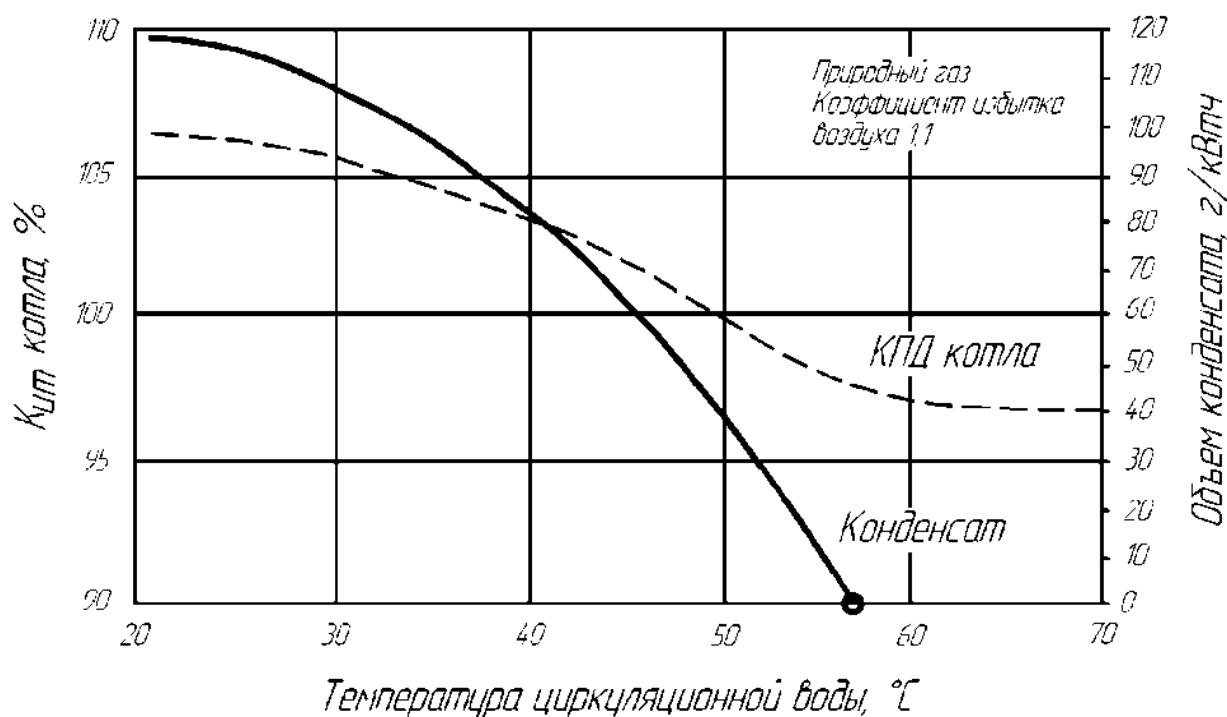


Рис. 3.6. Влияние температуры циркуляционной воды на коэффициент использования топлива в котле  $K_{\text{ит}}$  и объем конденсата природного газа

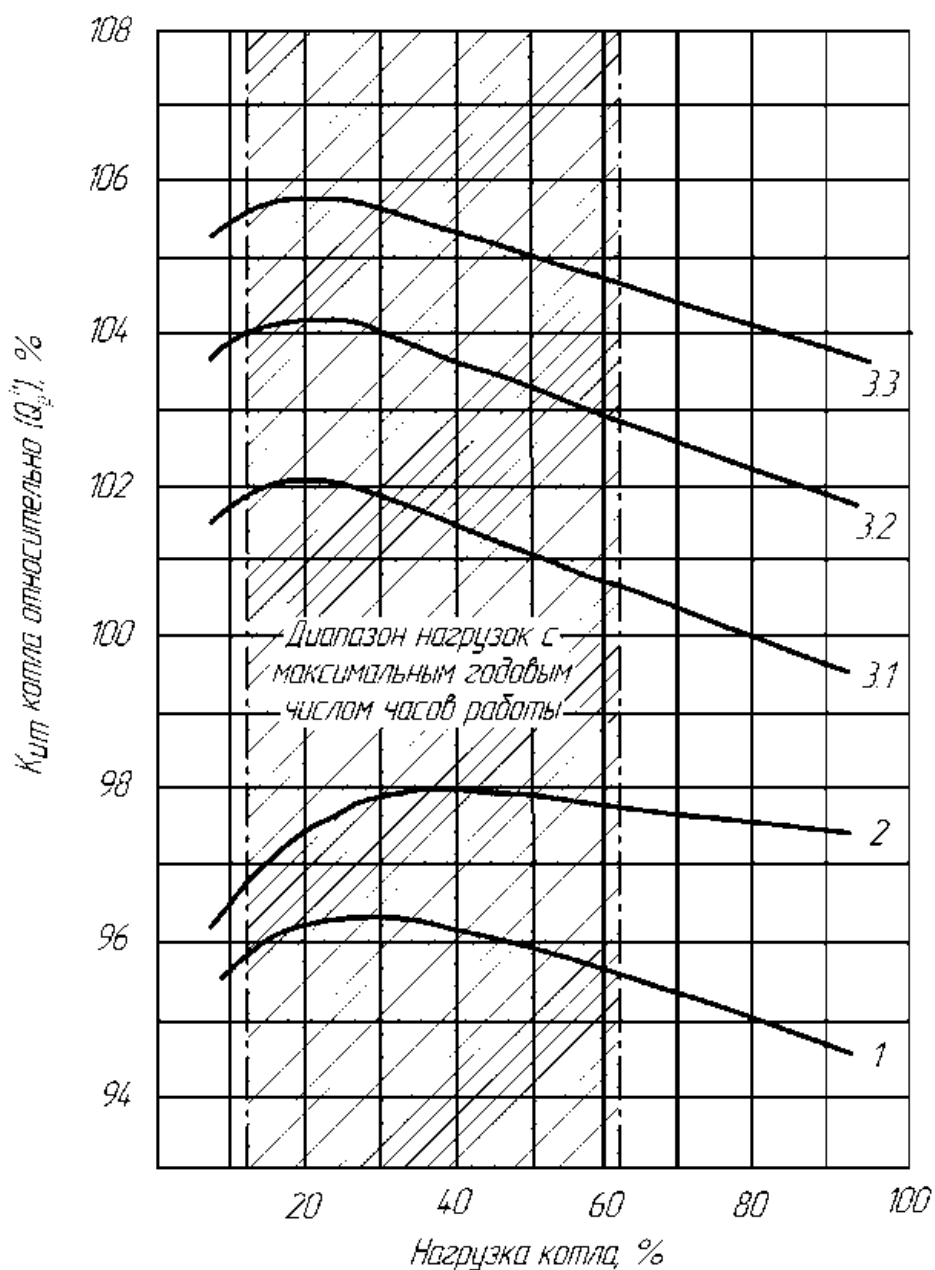


Рис. 3.7. Кривые изменения  $K_{ит}$  для полного использования теплоты сгорания в водогрейном котле:

- 1 – котел без экономайзера 70/50°C;
- 2 – котел с экономайзером для неконденсационного режима;
- 3 – котел с экономайзером для полного использования теплоты сгорания;
- 3.1 – температура воды на входе 50 °C;
- 3.2 – температура воды на входе 40°C;
- 3.3 – температура воды на входе 30 °C.

В табл. 3.3 представлены основные показатели работы конденсационных котлов при сжигании разных видов высокорекреационного топлива.

**Таблица 3.3 - Характеристики различных видов топлива**

Вид топлива	Параметры процесса				
	Низшая теплота сгорания, $Q_{н}^p$ , МДж/м <sup>3</sup> (кг)	Полная теплота сгорания, $Q_{в}^p$ ,МДж/м <sup>3</sup> (кг)	Точка росы продуктов сгорания, °С	Конденсат, г/кДж	Значение рН
Природный газ	35,58	39,49	55,6	44,4	2,8-4,9
Природный газ "L"	31,79	35,2	55,1	44,4	2,8-4,9
Пропан	93,2	101,23	51,4	36,1	1,8-3,7
Бутан	123,8	134,06	50,7	33,3	1,8-3,7
Дизтопливо (с содержанием серы ≤ 50 мг/кг)	42,84	45,79	47,0	27,8	1,8-3,7

3.6 Влияние основных параметров работы котла на коэффициент теплопередачи

Для расчета конструктивных параметров конденсационного котла требуется определить поверхность теплопередачи.

Для этого по балансовому уравнению находится мощность теплового потока  $Q$ , которую должна получить сетевая вода вместе с подпиткой от продуктов сгорания природного газа.

Используя данные, изложенные в разделе 3.3 находим расход воды и природного газа с учетом предотвращения подвисания воды и «захлебывания» в насадке при наличии или отсутствии дымососа.

Требуемая поверхность теплопередачи зависит от коэффициента теплопередачи « $K_T$ ». На указанный коэффициент влияет значительное количество факторов. Учитывая то, что при количестве переменных до 10 для описания « $K_T$ »

требуется огромный объем информации, в связи с чем возникла необходимость в использовании критериальных уравнений. Это позволяет значительно уменьшить количество переменных. При анализе размерностей использовали дополнение Хантли, которое позволяет уменьшить количество критериальных уравнений за счет увеличения количества независимых размерностей [36, 37]. Очевидно, что такие линейные размеры котла с насадкой, как высота насадки, ее ширина, длина (при прямоугольной конфигурации) оказывают совершенно разное влияние на технологические параметры работы котла. Поэтому представлены независимые размерности  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$ .

В табл. 3.4 представлена матрица решения критериального уравнения.

**Таблица 3.4 - Матрица решения критериального уравнения теплообмена в конденсационном котле**

	$L_x$	$L_y$	$L_z$	$M_{ж}$	$M_{г}$	$Q$	$T$	$\tau$	$N$
$K$	-2/3	-2/3	-2/3	0	0	1	-1	-1	1
$V_{г}$	-1	-1			1			-1	$a$
$W$	-1	-1		1				-1	$b$
$C_{п}$					-1	1	-1		$c$
$C_{в}$				-1		1	-1		$d$
$\mu_{в}$			-1	1				-1	$e$
$\mu_{п}$			-1		1			-1	$f$
$\rho_{в}$	-1	-1	-1	1					$g$
$\rho_{п}$	-1	-1	-1		1				$m$
$D/F$	1/2	1/2							$n$
$H$			1						$k$

$$\left\{ \begin{array}{l} a + b + g + m - \frac{1}{2}n = \frac{2}{3} \\ e + f + g + m - K = \frac{2}{3} \\ b - d + e + g = 0 \\ a - c + f + m = 0 \\ c + d = 1 \\ a + b + e + f = 1 \end{array} \right.$$

$$e = 1 - a - b - c + a + m = 1 + m - b - c;$$

$$g = d - b - e = 1 - c - b - 1 - m + b + c;$$

$$k = e + f - \frac{2}{3} = 1 + m - b - c + c - a - m - \frac{2}{3} = \frac{1}{3} - a - b;$$

$$\begin{aligned}
a &= a; \\
c &= c; \\
d &= 1 - c; \\
m &= m; \\
f &= c - a - m; \\
b &= b; \\
e &= 1 + m - b - c; \\
g &= -m; \\
k &= \frac{1}{3} - a - 2b; \\
n &= 2a + 2b - \frac{4}{3}.
\end{aligned}$$

При орошении насадки сетевой водой получена следующая критериальная зависимость

$$\frac{Kd}{\mu_B C_B} = \left(\frac{Vd}{\mu_G}\right)^{0,16} \cdot \left(\frac{Wd}{\mu_B}\right)^{0,85} \left(\frac{\rho_G \mu_B}{\rho_B \mu_G}\right)^m \left(\frac{C_G \mu_G}{C_B \mu_B}\right)^c \left(\frac{d}{H}\right)^{0,68}.$$

Основные параметры представленные в матрице:

где  $K$  – коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к воде,  $\text{кДж/м}^2\text{ }^0\text{C}$ ;  
 $V_G$  – массовая скорость продуктов сгорания природного газа,  $\text{кг/м}^2\text{c}$ ;  
 $W$  – массовая скорость подогреваемой воды,  $\text{кг/м}^2\text{c}$ ;  
 $C_{\Pi}$  – теплоемкость продуктов сгорания природного газа,  $\text{Дж/кг}^0\text{C}$ ;  
 $C_B$  – теплоемкость подогреваемой воды,  $\text{Дж/кг}^0\text{C}$ ;  
 $\mu_{\Pi}$  – динамическая вязкость продуктов сгорания природного газа,  $\text{кг/м}\cdot\text{c}$ ;  
 $\mu_B$  – динамическая вязкость подогреваемой воды,  $\text{кг/м}\cdot\text{c}$ ;  
 $\rho_{\Pi}$  – плотность продуктов сгорания,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $\rho_B$  – плотность подогреваемой воды,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $d$  – характерный линейный размер (квадратный корень из поверхности орошения), м;  
 $H$  – высота тепло- и массообменной насадки, м.

Как видно из представленного уравнения коэффициент теплопередачи относительно мало зависит от числа Рейнольдса газового потока  $Re$  (влияние примерно как корень шестой степени) и в значительной степени зависит от числа Рейнольдса потока воды. Конструктивные особенности насадки – соотношение

$$\frac{d}{H} = \frac{\sqrt{F}}{H} \text{ влияют в степени } \sim 2/3.$$

Выводы по разделу:

1. Использование конденсационных котлов системы СВТ позволяет отказаться от использования химводоочистки для подготовки подпиточной воды и установки дымососов.
2. Применение в котле тепло- и массообменной насадки обеспечивает повышение  $K_{ИТ}$  при генерации тепла до 108-110% и снижение эмиссии токсичных газов ( $NO_x$  и  $CO$ ) до величин значительно меньших европейских норм.
3. Котел может быть использован для децентрализованного теплоснабжения, например, с установкой на крыше зданий.
4. Конденсация паров воды на тепло- и массообменной насадке увеличивает коэффициент теплоотдачи от продуктов горения природного газа более чем в 15 раз.

## РАЗДЕЛ 4

### УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНДЕНСАЦИОННЫХ КОТЛОВ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НАСЫЩЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДИОКСИДОМ УГЛЕДОРОДА

#### 4.1 Обоснование необходимости улучшения экологических показателей котлов, используемых в системах теплоснабжения

Теплофикационные котельные расположены обычно в селитебных районах. Концентрация загрязнителей в приземном слое атмосферы оказывает губительное влияние на экологическую обстановку указанных районов

Учитывая то, что высота дымовых труб котельных составляет примерно 50 м, а высота дымовых труб котлов тепловых электростанций достигает 330 м, то при близких массах выброса загрязнителей их концентрация в приземном слое может быть больше для котельных в 43 раза. Следует учесть, что масса выбросов котельных естественно существенно меньше, однако их количество больше и они практически не оборудованы какими-либо устройствами по ограничению эмиссии прежде всего оксидов азота  $\text{NO}_x$ .

На рис. 4.1 показано изменение содержания  $\text{NO}$  в дымовых газах конденсационного котла от содержания кислорода в степени  $\frac{1}{2}$ . Как видно из представленных данных существует «критическое» содержание кислорода ( $\sim 5,9\%$ ), превышение которого приводит к резкому увеличению содержания  $\text{NO}$ .

Данные исследований отечественных и зарубежных ученых [22] показывают, что генерация  $\text{NO}_x$  зависит, в основном, от температуры в ядре факела, времени нахождения продуктов сгорания в зоне высоких температур и избытка воздуха.

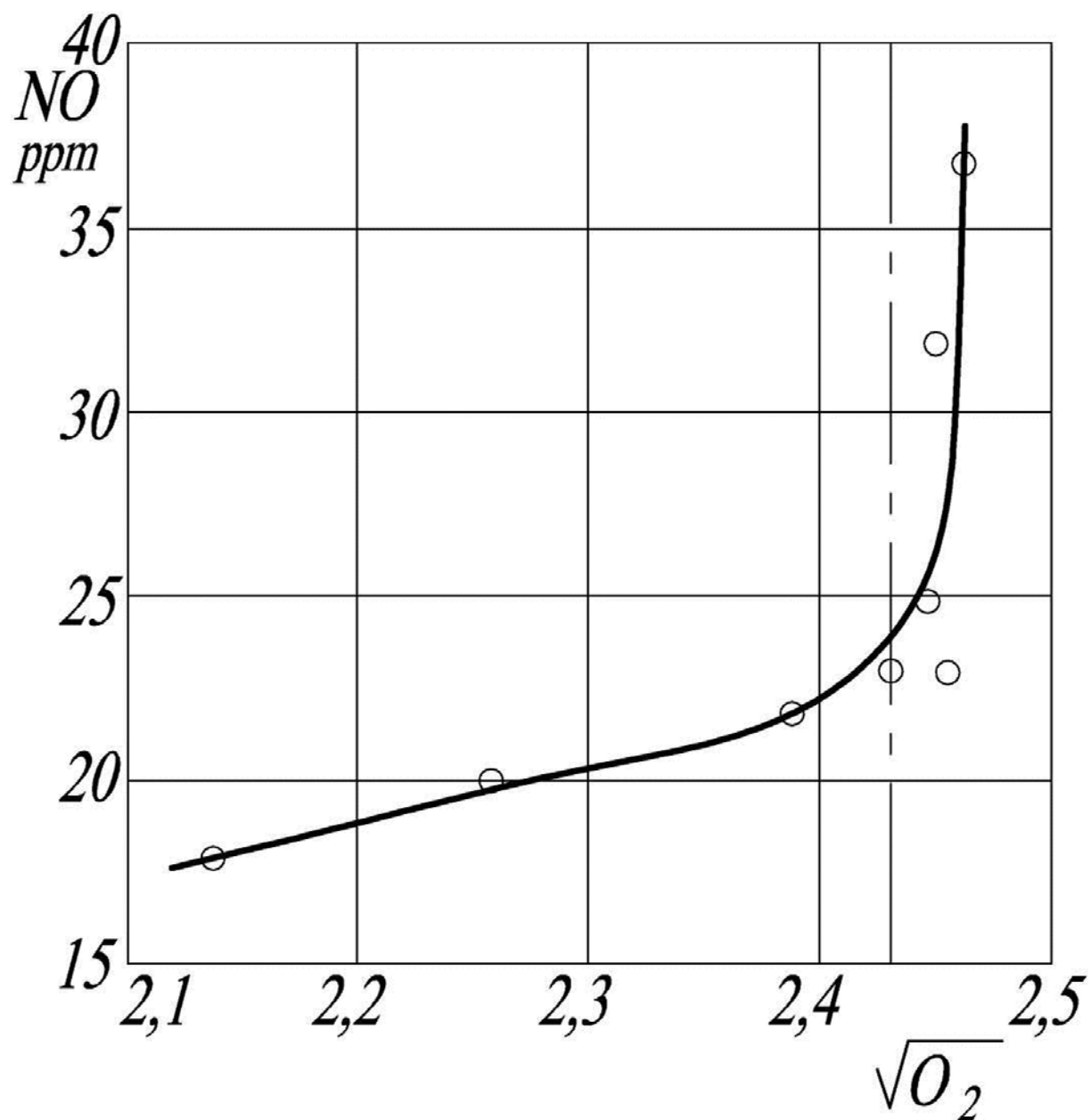


Рисунок 4.1 - Изменение содержания NO в дымовых газах от содержания кислорода в степени  $1/2$ .



На рис. 4.2 показано изменение концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания природного газа в зависимости от времени нахождения дымовых газов в камере сгорания и избытка воздуха  $\lambda$ .

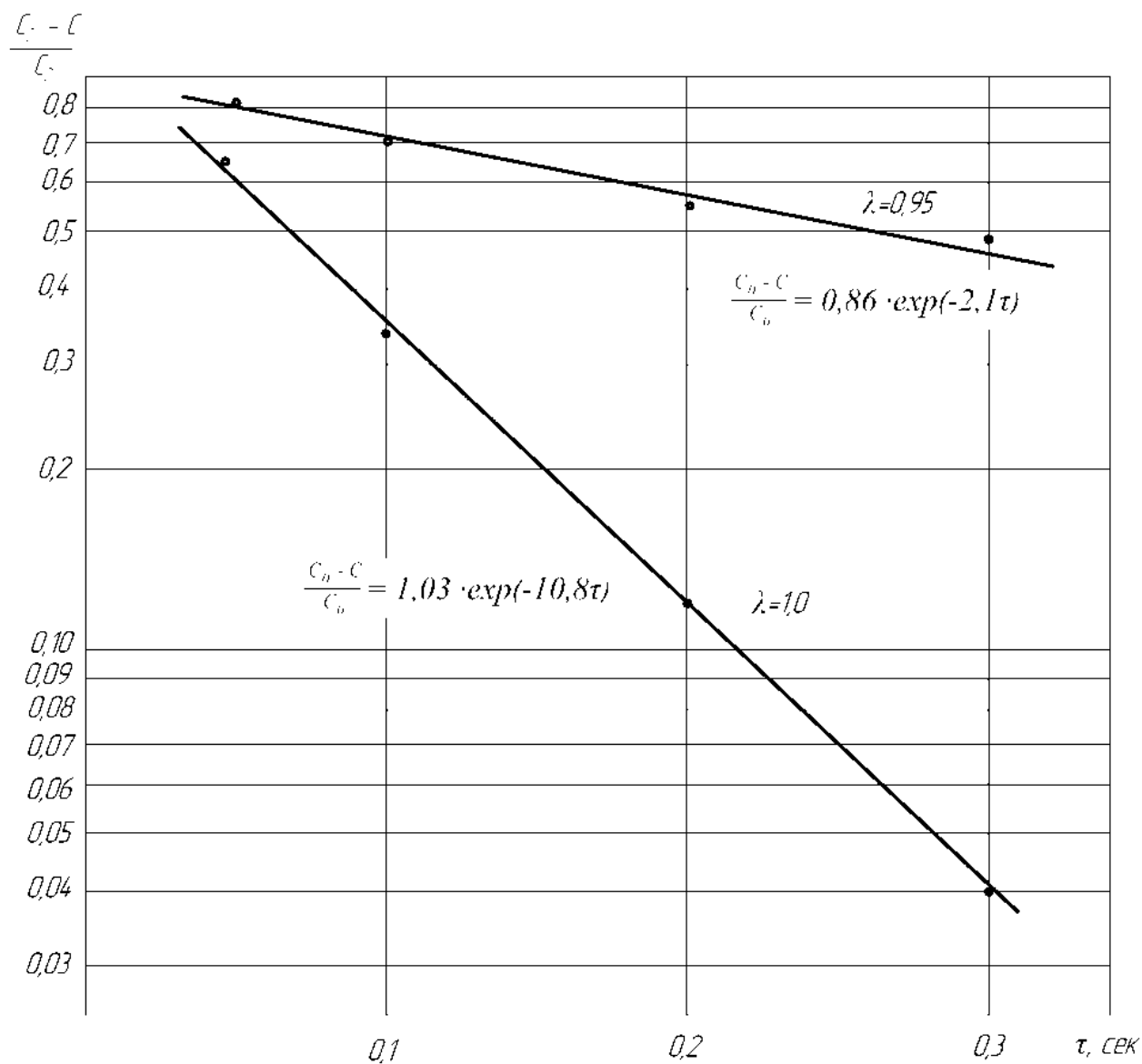


Рис. 4.2. Зависимость степени генерации  $\text{NO}_x$  от избытка воздуха « $\lambda$ » и времени нахождения продуктов сгорания природного газа « $\tau$ » в зоне высоких температур

Указанные зависимости описываются формулами:

для стехиометрического расхода воздуха ( $\lambda = 1$ )

$$\frac{C_0 - C}{C_0} = 0,86 \cdot \exp(-2,1\tau) ; \quad (4.1)$$

для избытка воздуха ( $\lambda = 0,95$ )

$$\frac{C_0 - C}{C_0} = 1,03 \cdot \exp(-10,8\tau) , \quad (4.2)$$

где  $C_0$  – генерация  $\text{NO}_x$  при времени контакта  $> 1$  мин;

$C$  – генерация  $\text{NO}_x$  при времени контакта,  $\tau$ , с.

По приведенным данным основное влияние на эмиссию  $\text{NO}_x$  оказывает время нахождения дымовых газов в зоне высоких температур. При увеличении времени пребывания  $> 0,3$  сек наиболее существенно влияние избытка воздуха ( $\lambda$ ).

Для уменьшения времени пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур объем камеры сгорания был выбран таким, чтобы указанное время в диапазоне наиболее вероятных нагрузок котла составляло 0,3-0,5 с.

После выхода из камеры сгорания продукты горения топлива быстро охлаждались орошающей водой до температур 900 - 1000 °С. Это позволило обеспечить концентрации основных загрязнителей окиси углерода и оксидов азота  $\text{NO}_x$  на уровне соответствующем лучшим показателям работы котлов. Значения уровней генерации оксидов углерода СО и азота  $\text{NO}_x$  при сравнении с нормами «Голубой ангел», Гамбургскими нормами и данными испытаний водогрейных котлов равны, соответственно, 40 и 55; 13 и 23; и 20 и 18 м<sup>2</sup>/кВт отпущенного тепла.

В таблице 4.1 представлены основные экологические и технологические показатели котла СВТ.

Технико-экономические показатели котлов для котельной расположенной в г. Тетиеве приведены в прил. Г.

Таблица 4.1

**Таблица 4.1. - Технологические показатели работы котла СВТ-0,35**

	O <sub>2</sub> , %	CO, ppm	CO <sub>2</sub> , %	П <sub>дг</sub> , %	NO, ppm	NO <sub>x</sub> , ppm	α	t° <sub>дг</sub>	η, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5,9	33	8,5	2,4	23	25	1,39	56,4	97,6
2	6,1	38	8,4	2,3	23	25	1,41	54,1	97,7
3	6,0	36	8,4	-1,7	32	33	1,40	44,1	101,7
4	5,9	43	8,5	2,4	23	24	1,39	56,9	97,6
5	5,3	33	8,8	1,1	28	29	1,34	61,7	98,9
6	5,7	35	8,6	-2,8	37	39	1,37	41,4	102,8
7	6,7	43	8,1	2,4	21	22	1,46	54,9	97,6
8	4,5	55	9,3	0,2	31	33	1,27	50,9	99,8
9	6,0	26	8,4	2,2	25	26	1,4	53,7	97,8
10	4,6	50	9,2	0	18	18	1,28	51,4	100
11	5,7	18	8,6	-2,9	22	23	1,37	42,8	102,9
12	5,1	31	8,9	-3,8	20	21	1,32	41,0	103,8

Прим: П<sub>дг</sub> – потери тепла с дымовыми газами, %;

α – избыток воздуха (в долях);

t°<sub>дг</sub> – температура дымовых газов, °С;

O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> – содержание кислорода и углекислого газа в дымовых газах, %;

CO, NO, NO<sub>x</sub> – содержимое окиси углерода, окиси и двуокиси азота, в ppm (частях на миллион);

η – коэффициент использования топлива, %.

## 4.2 Обоснование необходимости удаления диоксида углерода из теплоносителя

Диоксид углерода является причиной коррозионных процессов в котлах и разветвленной сети коммуникаций систем теплоснабжения.

Согласно закону Вант-гоффа повышение температуры на каждые  $10^0\text{C}$  увеличивает скорость протекания реакций в 2-4 раза [37]. Аналогичная закономерность распространяется также на процесс коррозии стали под действием угольной кислоты в закрытых системах тепловых сетей.

Наличие диоксида углерода в теплоносителе в исследуемом котле обусловлено двумя причинами: абсорбцией с дымовых газов и термической деструкцией гидрокарбонатов.

В работе исследовано влияние вклада каждой из указанных составляющих. Содержание диоксида углерода в теплоносителе при непосредственном контакте с дымовыми газами можно определять расчетным путем. Согласно закону Генри между парциальным давлением газа «р» и его концентрацией в газовой фазе существует зависимость

$$p = k_1 \cdot C . \quad (4.3)$$

Однако, как было установлено И.Р. Кричевским, отклонение от закона Генри весьма значительны даже при давлении менее 1 бар. Поэтому необходимо было установить степень абсорбции диоксида углерода непосредственно из продуктов сгорания природного газа при непосредственном контакте с теплоносителем.

Увеличение концентрации диоксида углерода способствует существенному повышению концентрации ионов водорода и, соответственно, снижению рН среды. При диссоциации угольной кислоты по первой ступени



при  $25^0\text{C}$  константа диссоциации составит

$$k = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = 4,5 \cdot 10^{-7} . \quad (4.5)$$

Так как  $[H^+] = [HCO_3^-]$ ,  $[H_2CO_3] = [CO_2] - [H^+] = [CO_2] - [HCO_3^-]$ .

Здесь  $[CO_2]$  – общая концентрация диоксида углерода в растворе. При этом

$$k = \frac{[H^+]^2}{[CO_2] - [H^+]}$$
(4.6)

$$\text{или } [H^+]^2 + k[H^+] - k[CO_2] = 0.$$

Решая квадратное уравнение, получим:

$$[H^+] = -\frac{k}{2} \pm \sqrt{\frac{k^2}{4} + k[CO_2]}.$$
(4.7)

Нетрудно убедиться, что при малых значениях константы диссоциации, основное влияние на pH раствора оказывает концентрация диоксида углерода.

За счет буферных свойств природной воды значение pH существенно больше, однако следует учитывать, что только доли процентов  $CO_2$  участвуют в формировании pH. Таким образом, коррозионное действие диоксида углерода пролонгировано во времени.

#### 4.3 Влияние температуры на абсорбцию диоксида углерода из продуктов сгорания природного газа и интенсивности образования отложений

Степень абсорбции диоксида углерода из продуктов горения в значительной степени зависит от температуры. На рис. 4.3 показана зависимость коэффициента поглощения водой  $CO_2$  и  $O_2$  от температуры теплоносителя. Повышение температуры до величины близкой к  $100^\circ C$  обеспечивает снижение коэффициента поглощения диоксида углерода в 25-40 раз [38].

За счет подогрева воды на насадке до температуры близкой к  $100^\circ C$  и регулирования температуры сетевой воды в прямой линии путем байпасирования части потока помимо насадки обеспечен деаэрирующий эффект и снижение концентрации потенциально опасных коррозионных агентов.

Влияние температуры воды после подогрева на остаточное содержание диоксида углерода определено на конденсационном котле мощностью 300 МВт. Котел установлен в г. Буча Киевской области.

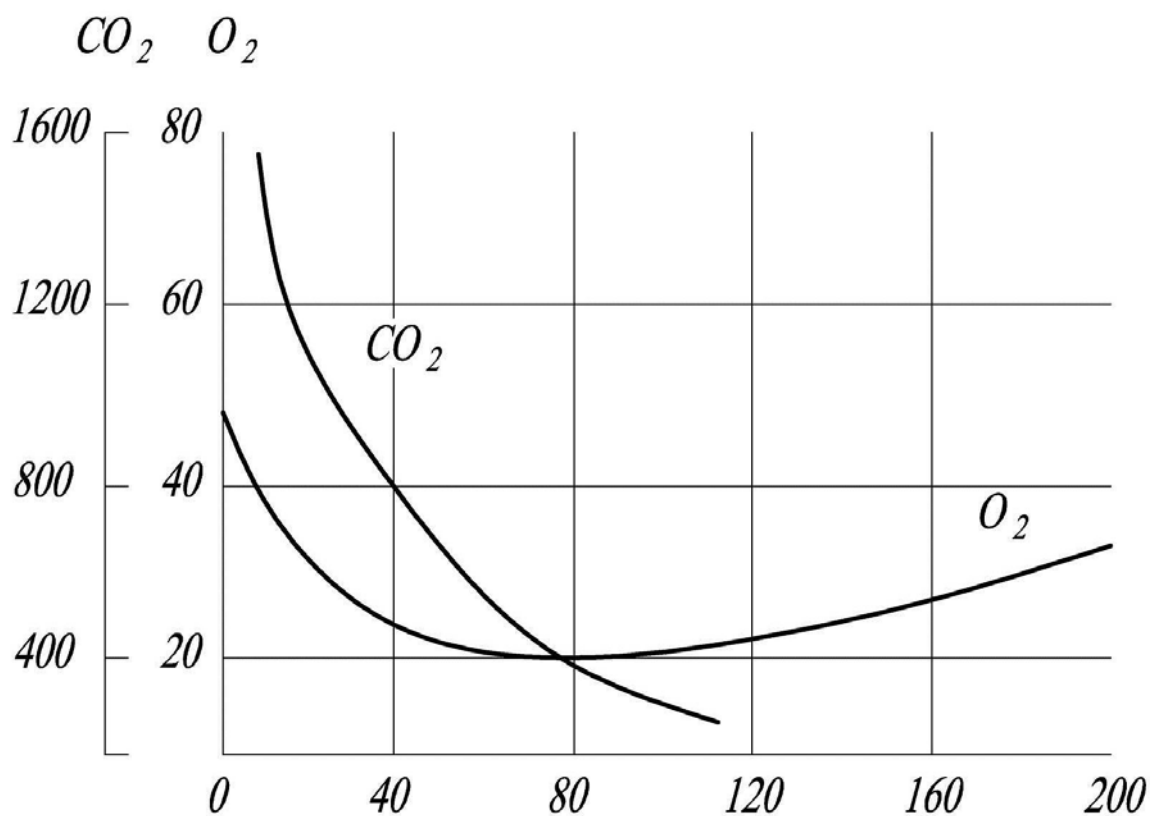


Рис. 4.3. Зависимость коэффициента поглощения водой  $CO_2$  и  $O_2$  от температуры теплоносителя

Зависимость остаточного содержания диоксида углерода в теплоносителе от температуры показана на рисунках 4.4, 4.5.

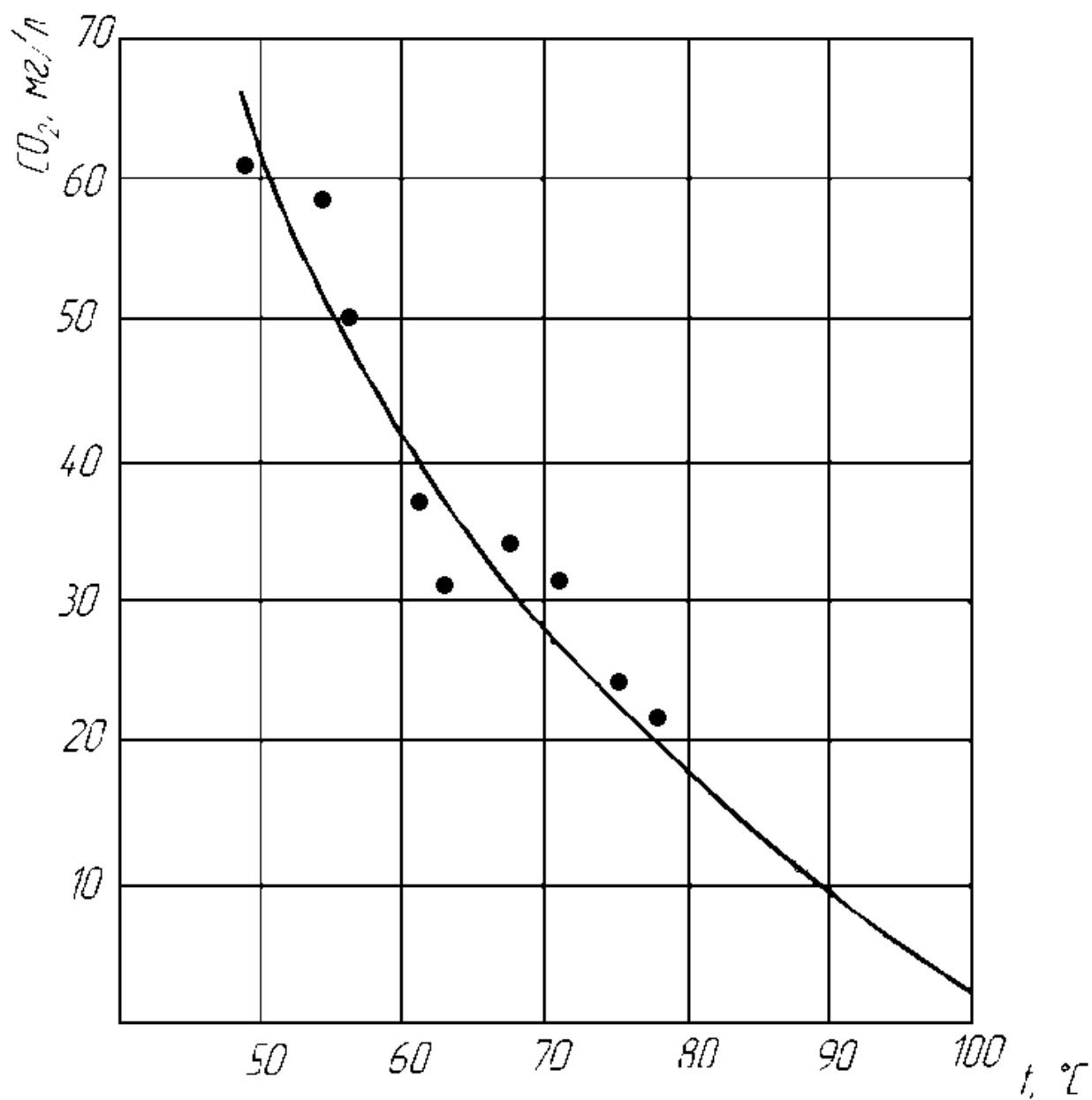


Рис. 4.4. Зависимость остаточного содержимого углекислого газа  $\text{CO}_2$  от температуры воды при непосредственном контакте воды с продуктами сгорания природного газа  $t$

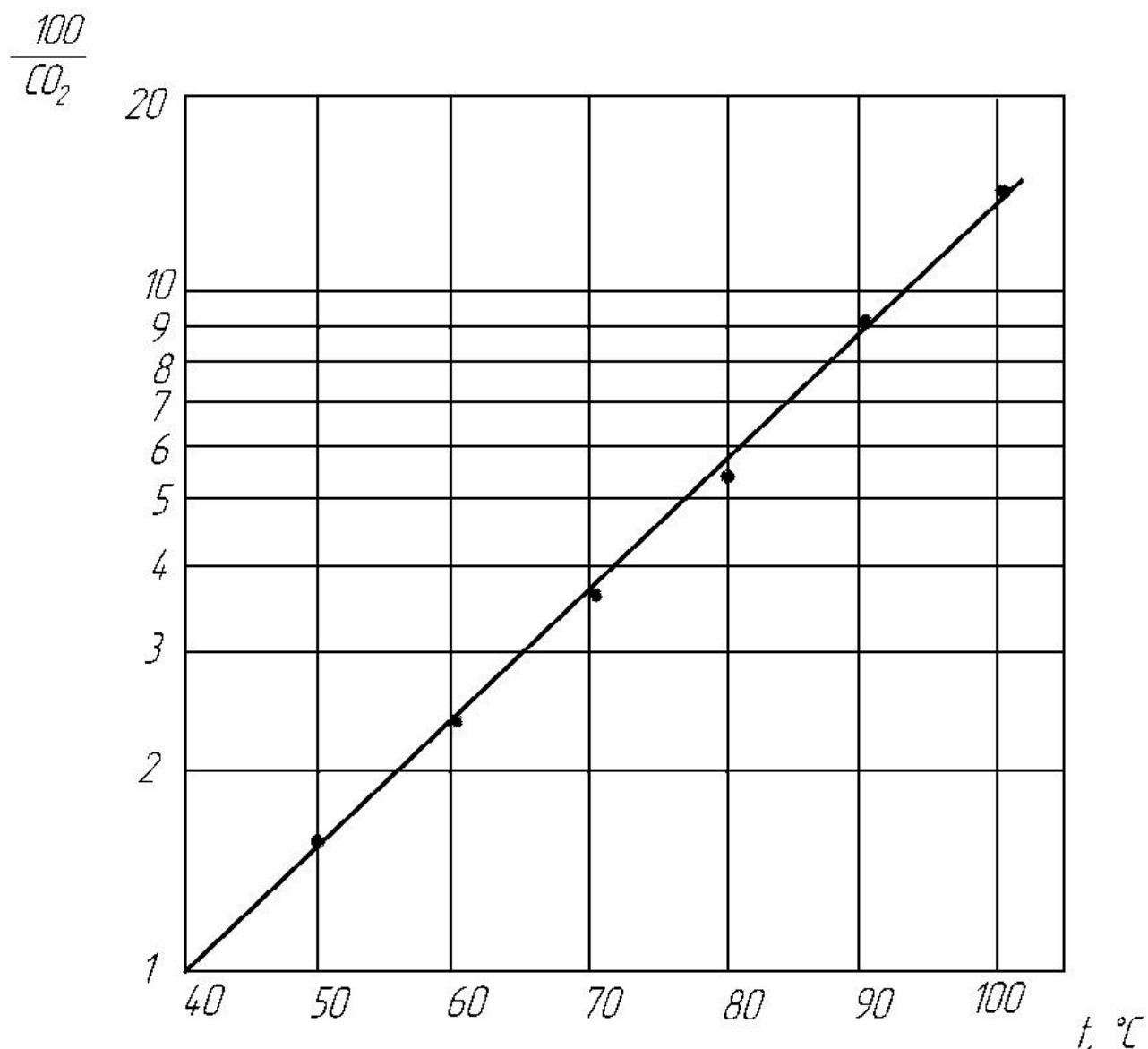
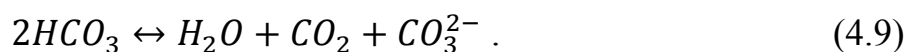


Рис. 4.5. Зависимость остаточного содержания углекислого газа,  $100/\text{CO}_2$  в теплоносителе от его температуры,  $t$

Представленные данные с высокой степенью надежности могут быть аппроксимированы экспоненциальной зависимостью

$$\text{CO}_2 = 5,88 \cdot 10^2 \exp(-4,44 \cdot 10^{-2}t) . \quad (4.8)$$

Циркулирующая в тепловой сети вода обогащается двуокисью углерода и при отсутствии прямого контакта воды с продуктами сгорания топлива. Это происходит в результате термической диссоциации гидрокарбонатных ионов, присутствующих в природных водах. Процесс идет по схеме:





Образованные при этом карбонатные ионы являются основной причиной возникновения накипи на поверхности нагрева. Это увеличивает термическое сопротивление переносу тепла, температуру греющих стенок поверхностей нагрева и вызывает повышение расхода тепла, температуру греющих стенок поверхностей нагрева и вызывает повышение расхода топлива на подогрев воды. Как показано в работе [39], изменение температуры греющей стенки от 60<sup>0</sup>С до 90<sup>0</sup>С увеличивает интенсивность отложения солей примерно в 13 раз.

Интенсивность образования отложений зависит также от так называемого карбонатного индекса – произведения концентраций ионов кальция на щелочность воды и времени контакта воды с поверхностями нагрева.

При щелочности (карбонатной жесткости) воды, которая нагревается,  $1,3-1,4 \frac{\text{мг}\cdot\text{ЭКВ}}{\text{дм}^3}$  и длительности нагрева 40-60с (что характерно для водогрейных котлов) интенсивность накипеобразования при температуре нагрева до 130-150<sup>0</sup>С столь значительна, что на протяжении отопительного сезона на каждом квадратном метре поверхности нагрева образуется примерно 2 кг отложений. При том же уровне температур и качестве воды для сетевых подогревателей, в которых длительность нагрева не превышает 5с, указанное количество отложений образуется после 6-7 лет эксплуатации оборудования [39].

При прямом контакте циркуляционной воды с продуктами горения природного газа, как показал опыт эксплуатации отмеченного выше конденсационного котла, отложения на теплообменной насадке вообще не образуются. Исследование влияния температуры и длительности нагрева теплоносителя на интенсивность гидролиза гидрокарбонатов. Кроме поглощения диоксида углерода с продуктов сгорания топлива происходит его генерация за счет термической диссоциации гидрокарбонатных ионов. По данным измерений концентрации диоксида углерода по отдельным этажам 12-ти этажного жилого дома в г. Буча Киевской области она составляет от 35 до 45 мг/дм<sup>3</sup> при подогреве воды в водогрейных котлах без прямого контакта теплоносителя с продуктами горения топлива. Это указывает на существенный вклад термической диссоциации гидрокарбонатов в генерацию диоксида углерода.

Для оценки влияния температуры на степень разложения гидрокарбонатов проведено несколько серий опытов при различной длительности нагрева воды при заданной температуре. Степень термической диссоциации гидрокарбонатов определялась по величине остаточной щелочности воды.

Изменение концентрации гидрокарбонатных ионов во времени, очевидно, пропорционально их текущей концентрации. Таким образом,

$$\frac{dC}{d\tau} = -\alpha \cdot C \quad (4.10)$$

После интегрирования в пределах от  $C_0$  до  $C$  и от  $0$  до  $\tau$  получаем

$$\frac{C}{C_0} = -\exp(\alpha \tau) \quad (4.11)$$

Приведенные на рис. 4.6. данные подтверждают характер указанной зависимости.

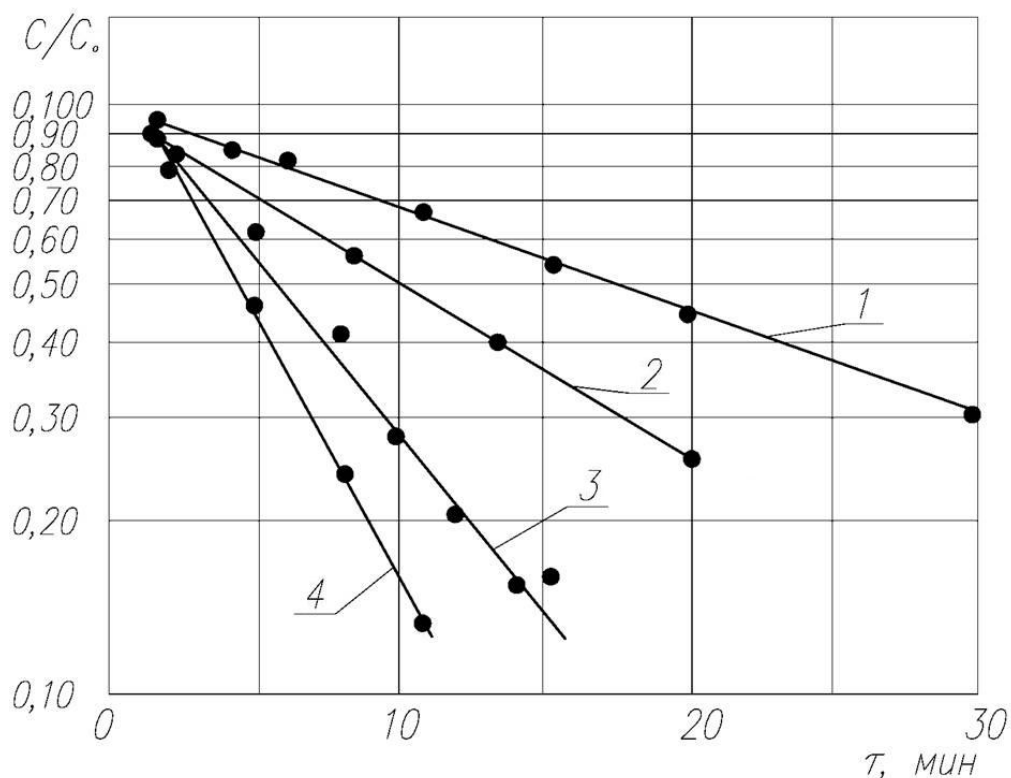


Рис. 4.6. Зависимость остаточной концентрации гидрокарбонатных ионов  $C/C_0$  от времени,  $\tau$  и температуры,  $t$ :

- 1 – температура  $t = 73^\circ\text{C}$ ;
- 2 – температура  $t = 80^\circ\text{C}$ ;
- 3 – температура  $t = 88^\circ\text{C}$ ;
- 4 – температура  $t = 93^\circ\text{C}$ .

Значение коэффициента  $\alpha$  является экспоненциальной функцией температуры, как видно из рис. 4.7.

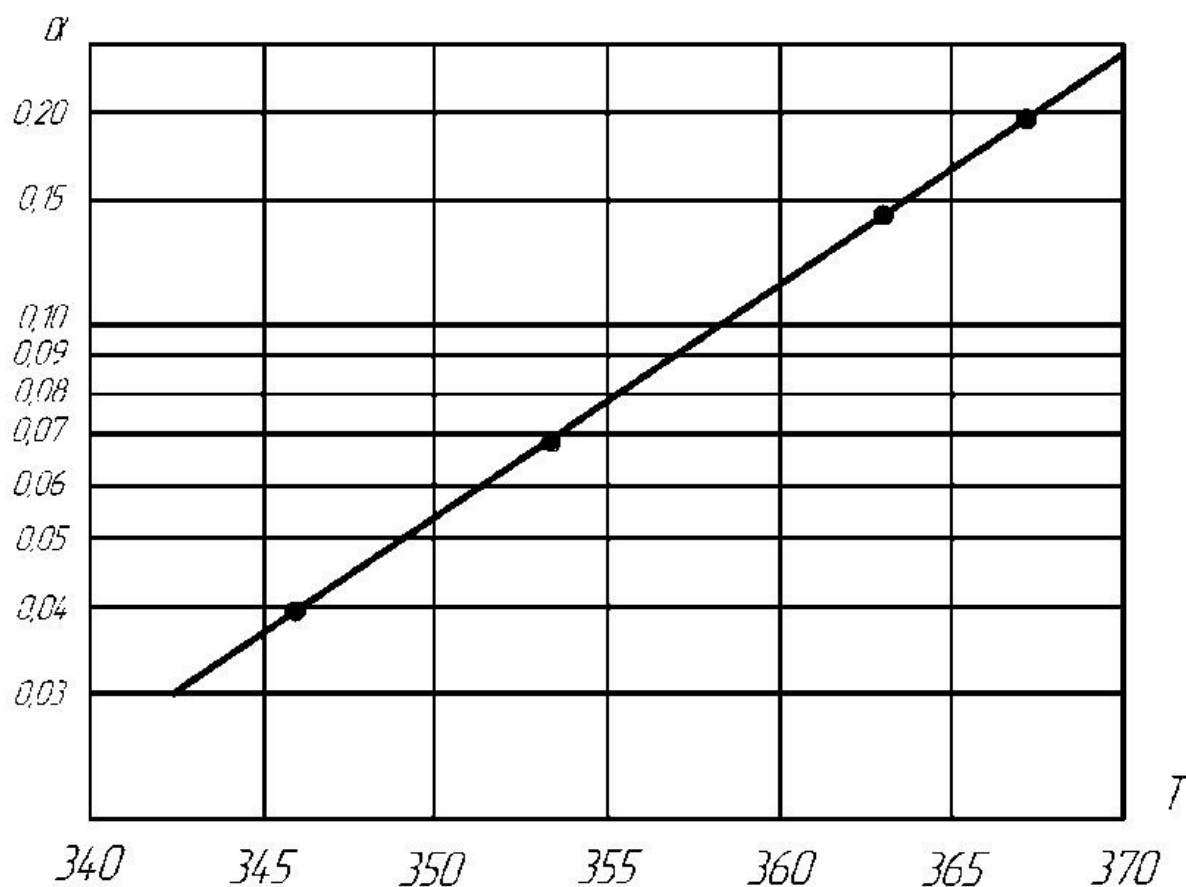


Рис. 4.7. Зависимость коэффициента  $\alpha$  от абсолютной температуры воды  $T$

После обработки экспериментальных данных получена следующая зависимость показателя  $\frac{C_0}{C}$ , которая характеризует степень термической диссоциации гидрокарбонатных ионов от абсолютной температуры ( $T$ ) длительности действия ( $\tau$ ) определенного уровня температур

$$\frac{C_0}{C} = \exp[2,157 \cdot 10^{-13} \cdot \tau \cdot \exp(0,075\tau)] \quad (4.12)$$

Как видно из приведенных данных, в области температур, приблизительно, до  $80^\circ\text{C}$  процесс термической диссоциации гидрокарбонатных ионов является относительно медленным и существенно ускоряется при последующем повышении температуры воды. Учитывая то, что на насадке в нашем случае вода

подогревается до температуры 95-97<sup>0</sup>С, эту составляющую поступления в воду диоксида углерода необходимо учитывать.

Измерение концентрации токсичных компонентов осуществлялось за счет отбора проб из газохода котла с помощью специального зонда. Зонд погружался в газоход через штуцер на глубину примерно 1/3-1/2 от диаметра газохода. Отбор проб осуществляется вакуумным отсасывающим устройством, входящим в комплект прибора. Функциональная схема газоанализатора приведена в прил. В. После отбора пробы и их анализа результаты распечатывались на принтере, входящим в комплект прибора.

#### 4.4 Влияние щелочности и рН воды на равновесное содержание диоксида углерода

Равновесное содержание диоксида углерода над раствором зависит не только от температуры, но и от щелочности и рН воды. Равновесие может достигаться уже после поступления подогретой воды в тепловую сеть. Учитывая то, что некоторые фирмы применяют присадку в сетевую воду щелочных агентов представляет практическое значение оценка влияния указанных факторов на равновесное содержание диоксида углерода.

В данной работе выполнена оценка влияния температуры на равновесное содержание СО<sub>2</sub> над раствором. Приведенные на рис. 4.8 данные изменения равновесного содержания СО<sub>2</sub> в растворе «С» в зависимости от абсолютной температуры «Т» описываются с высокой степенью точности ( $R^2 > 98\%$ ) уравнением (4.13)

$$C = 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \exp^{2,49 \cdot 10^3 \frac{1}{T}} . \quad (4.13)$$

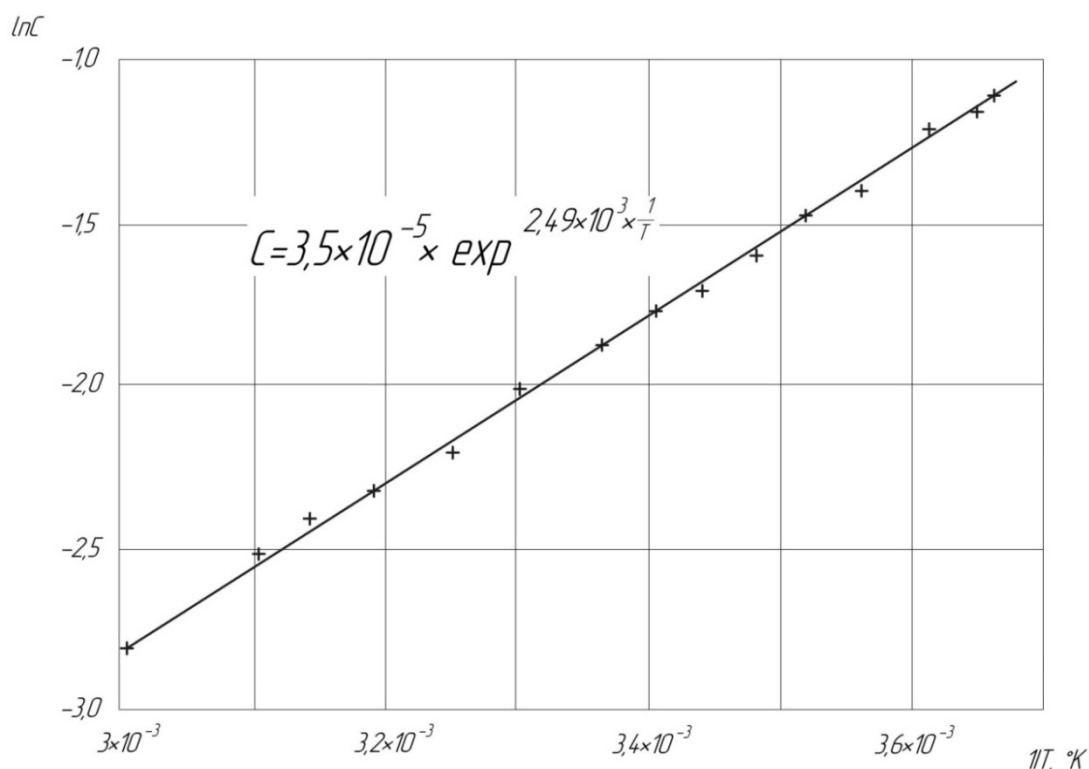
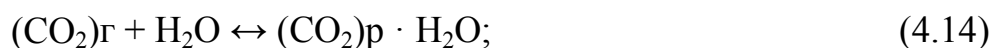


Рис. 4.8. Изменения равновесного содержания  $\text{CO}_2$  в растворе в зависимости от абсолютной температуры  $T$

Равновесное содержание  $\text{CO}_2$  в растворе зависит от смещения равновесия в результате реакций:



Таким образом, равновесное содержание  $\text{CO}_2$  и поступление его в газовую среду зависит от pH воды, являющегося функцией активности водородных ионов и щелочности воды. Представляла интерес количественная оценка влияния указанных факторов. На рис. 4.9 приведены данные влияния pH воды на равновесное содержание  $\text{CO}_2$ , полученные нами в результате обработки экспериментальных данных.

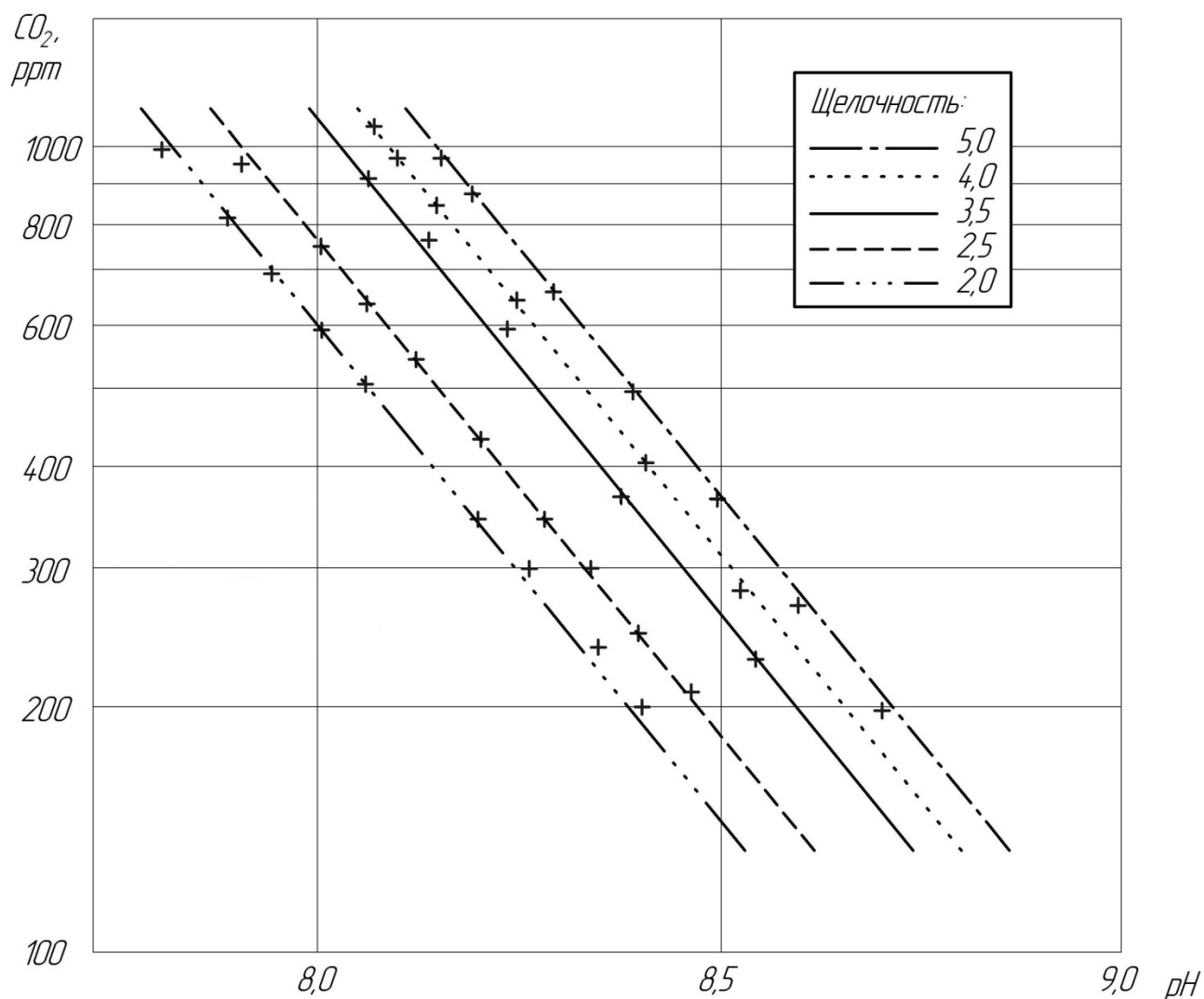


Рис. 4.9. Зависимость равновесного содержания углекислого газа  $\text{CO}_2$  от pH раствора при разной щелочности сетевой воды

$$\text{Щ} = 5,0; \text{CO}_2 = 23,2 \cdot 10^{10} \cdot \exp(-2,83 \text{ pH}), \text{ моль/л}; \quad (4.17)$$

$$\text{Щ} = 4,0; \text{CO}_2 = 19,6 \cdot 10^{10} \cdot \exp(-2,83 \text{ pH}), \text{ моль/л}; \quad (4.18)$$

$$\text{Щ} = 3,5; \text{CO}_2 = 16,4 \cdot 10^{10} \cdot \exp(-2,83 \text{ pH}), \text{ моль/л}; \quad (4.19)$$

$$\text{Щ} = 2,5; \text{CO}_2 = 11,7 \cdot 10^{10} \cdot \exp(-2,83 \text{ pH}), \text{ моль/л}; \quad (4.20)$$

$$\text{Щ} = 2,0; \text{CO}_2 = 9,16 \cdot 10^{10} \cdot \exp(-2,83 \text{ pH}), \text{ моль/л}. \quad (4.21)$$

Зависимость предэкспоненциального множителя от щелочности воды приведена на рис. 4.10.

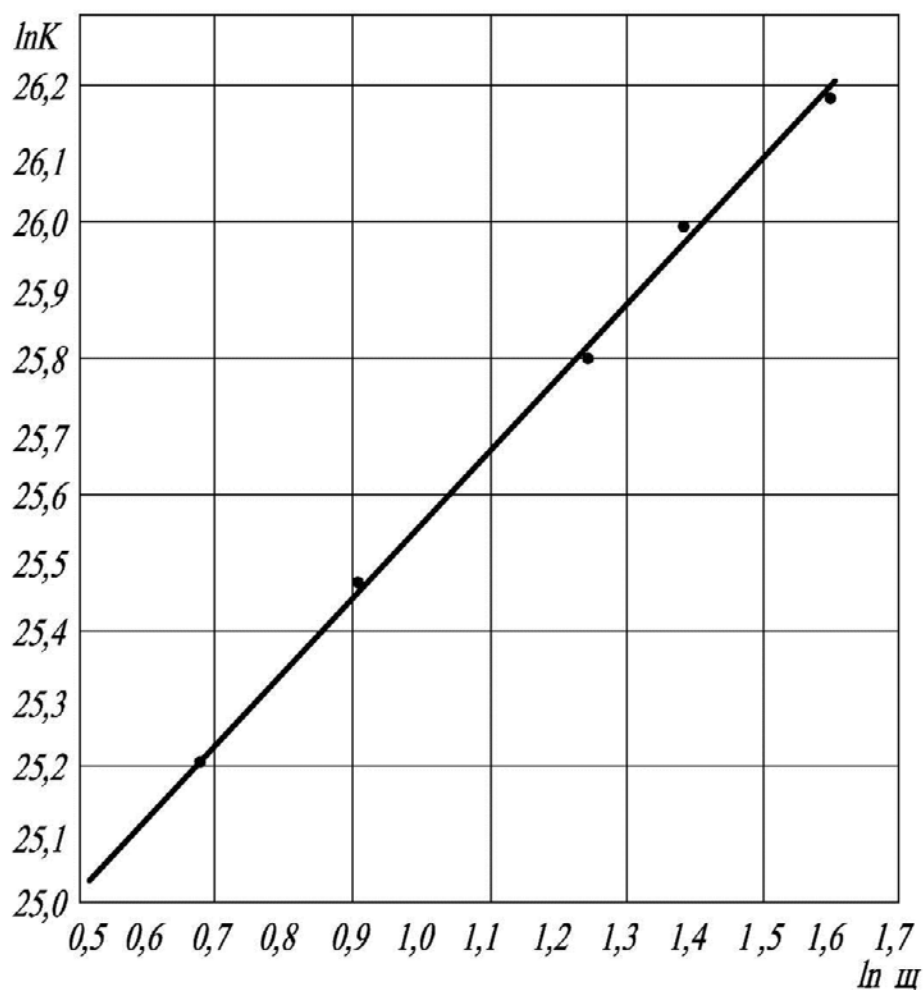


Рис. 4.10. Зависимость предэкспоненциального множителя  $\ln K$  от щелочности воды  $\ln \text{щ}$

Таким образом, зависимость равновесного содержания  $\text{CO}_2$  от pH и щелочности воды описывается уравнением (4.22)

$$\text{CO}_2 = 4,28 \cdot 10^{10} \cdot \text{Щ}^{1,08} \cdot \exp(-2,83\text{pH}) \quad (4.22)$$

Выводы по разделу:

1. Определены аналитические зависимости влияния температуры избытка воздуха и времени нахождения продуктов сгорания природного газа в зоне высоких температур на степень генерации  $\text{NO}_x$ .
2. Ограничение времени пребывания продуктов сгорания природного газа в зоне высоких температур за счет уменьшения объема камеры сгорания с последующим захолаживанием продуктов сгорания путем их орошения

подогреваемой водой позволяет обеспечить показатели эмиссии оксидов азота и углерода лучше чем по гамбургским нормам и нормам «Голубой ангел».

3. Время пребывания продуктов сгорания природного газа в зоне высоких температур ограничивается 0,3-0,5 с.

4. «Критическая» величина избытка кислорода превышение которой приводит к увеличению  $\text{NO}_x$ , полученное для котла СВТ составляет 5,9%.

5. Степень насыщения теплоносителя диоксидом углерода зависит от его поглощения из продуктов сгорания природного газа при непосредственном контакте теплоносителя с указанными продуктами и термолита гидрокарбонатов, присутствующих в подогреваемой воде.

6. Применение двухконтурного подогрева воды до температуры близкой к 95-98°C на теплообменной насадке и байпасирование части потока по кольцевому каналу в водогрейном котле обеспечивает деаэрационный эффект и снижение остаточного содержания диоксида углерода до ~5 мг/кг.

7. Найдены аналитические зависимости влияния длительности и температуры подогрева воды на степень гидролиза гидрокарбонатов.

8. Определены аналитические зависимости влияния щелочности и pH подогреваемой воды на равновесное содержание диоксида углерода.



## РАЗДЕЛ 5

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА

#### 5.1 Использование возобновляемых источников энергии

Возобновляемые источники энергии отличаются от традиционных тем, что они имеют сравнительно меньший энергетический потенциал и большую разветвленность или распространенность в пространстве. Это вызывает необходимость и целесообразность внедрения децентрализованного теплоснабжения.

В мировой практике существует тренд увеличения производства и использования возобновляемых источников энергии. Энергетическая ценность урожаев при выращивании разных сельскохозяйственных культур приведена на рис. 5.1, в Федеративной республике Германии (ФРГ) до 2020 г. 20% потребности в газе будет удовлетворяться за счет собственного биогаза [40].

Теплотворная способность биогаза  $Q_n^p$  существенно зависит от содержания в нем метана. По выполненным автором оценкам по содержанию метана в биогазе «а» от 60 до 97% зависимость теплотворной способности с точностью  $\pm 2\%$  может быть представлена формулой, предложенной автором

$$Q_n^p = 34,47 \cdot \alpha^{0,88}, \text{ МДж/м}^3. \quad (5.1)$$

Для повышения калорийности биогаза карбоновый газ из «сырого» биогаза обогащают за счет водной сорбции. Генерацию биогаза осуществляют последовательно в ферментаторах и постферментаторах.

По данным ФРГ даже при землях качество, которых существенно хуже, чем в Украине, 1 гектар кукурузы обеспечивает генерацию 17,2 МВт·ч энергии, а для зерновых – 12,9 МВт·ч [40, 41].

Типичная стоимость отдельных операций производства биогаза составляет в евроцентах €/кВт·ч: производство – 3,3–3,7; очистка и промышленное концентрирование метана – 1,2–6,3; транспорт в сетях – 0–3,5; обслуживание установок когенерации – 0,9–1,0 [42].

В Украине значительные объемы природного газа используются для потребностей в теплоснабжении. Общая потребность составляет 118,5 млн Гкал, в том числе для городов 112,1 млн Гкал и сельских местностей – 6,4 млн Гкал.

Сельскохозяйственные угодья в земельном фонде страны имеют объем 42,3 млн гектара. Даже, если отнести часть угодий для выращивания энергетических культур для удовлетворения потребностей для теплоснабжения необходимо всего 13–20 % площадей. При этом производительность будет составлять 2–3 тыс. м<sup>3</sup> метана с одного гектара, а выбросы парниковых газов сокращаются по меньшей мере в 3 раза [43,44].

Существуют много путей переработки биомассы. Основные из них приведены на рис. 5.1 [45,46,47].

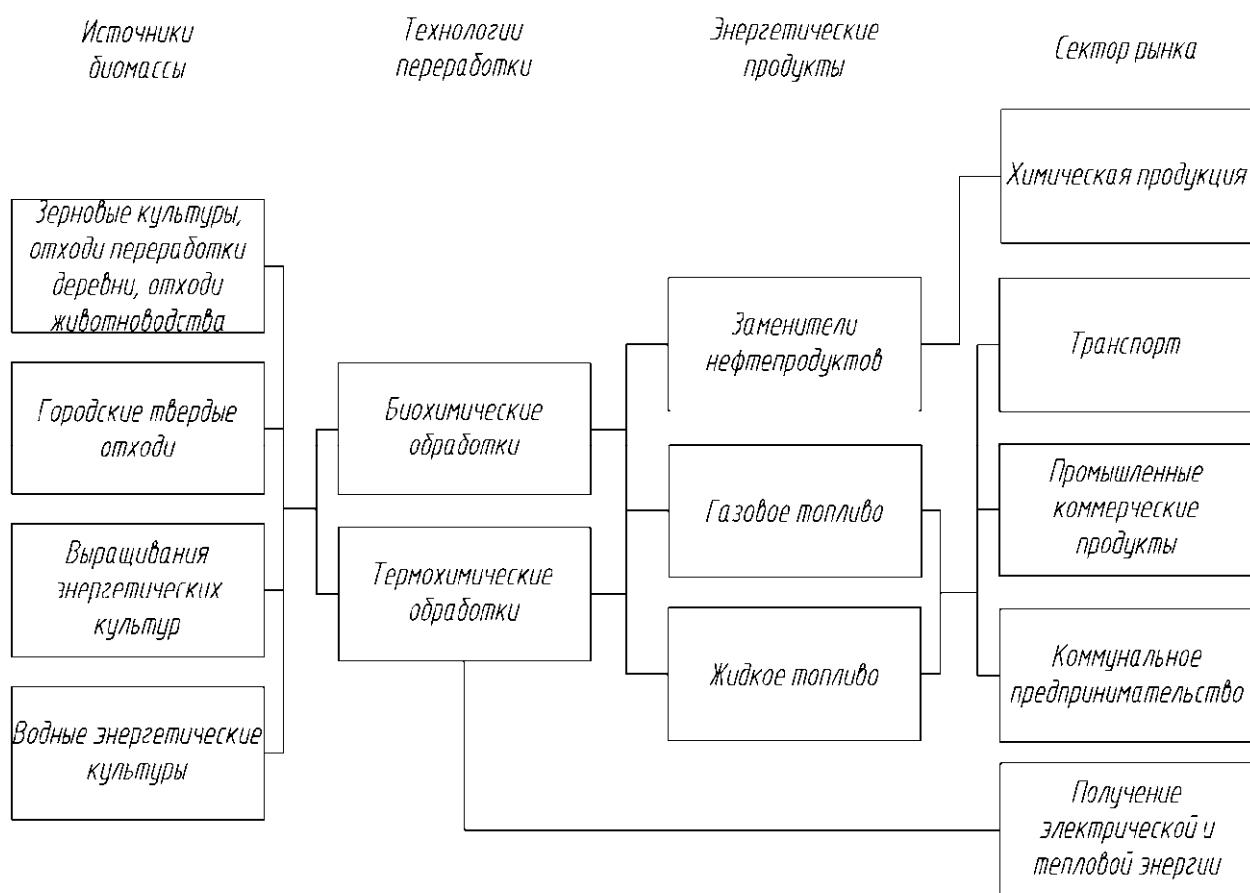


Рис. 5.1. Общий вид переработки сырья из биомассы

Удельный выход энергии при выращивании разнообразных культур приведен на рис. 5.2.

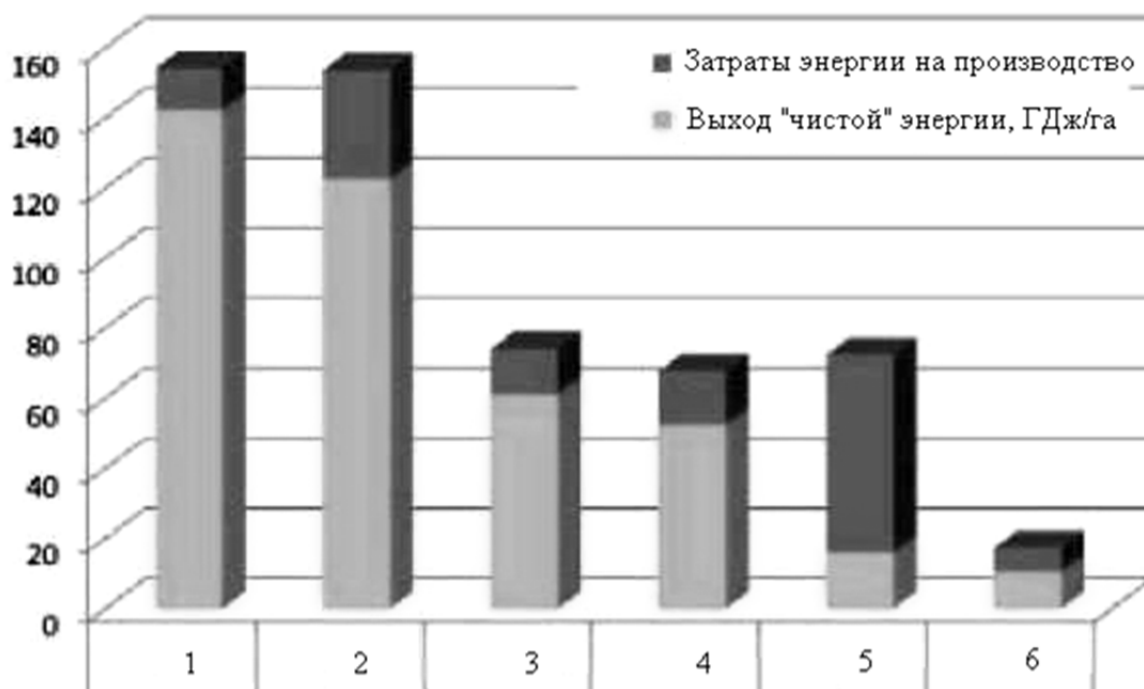


Рис. 5.2. Удельный выход энергии при выращивании энергетических культур:

- 1-сорго, пеллеты;
- 2-кукурузный силос;
- 3-многолетние травы при конверсии, соответственно, в биогаз и жидкое топливо;
- 4-этанол из целлюлозы;
- 5-этанол из кукурузных зерен;
- 6-биодизель из соевых бобов.

Следует отметить, что выращивание, например, рапса позволяет накапливать топливо и использовать его по мере необходимости. При этом в отличие от получения биодизеля для водогрейных котлов не возникает потребности этерификации с применением дорогих метилового или этилового спирта. При этом котлы оборудуются горелками, которые позволяют использовать жидкое или газовое топливо. Ряд фирм ФРГ изготавливают такие горелки. В горелках реализована возможность автоматического регулирования избытка воздуха.

Анализ мирового потребления энергоресурсов при обработке статистических данных показал, что имеет место экспоненциальный рост численности населения Земли, потребленных энергоресурсов и удельного энергопотребления.

В научных публикациях, в периодической печати прослеживается тенденция – единственным альтернативным энергоносителем для Украины является уголь. Однако объемы добычи угля постепенно снижаются. По существующим оценкам запасов угля промышленной категории в Украине хватит на 250-300 лет. Чтобы его добыть необходимы инвестиции и новые технологии, так как 80% оборудования ТЭС физически и морально устарели. Удельные затраты энергоресурсов на добычу 1 тонны угля весьма существенны и составляют: тепловой энергии 89 Мкал, электроэнергии – 125 кВт·ч. Кроме этого на обогащение 1 т. угля расходуется 10,3 кВт·ч электроэнергии.

Сложность положения использования энергоресурсов усугубляется тем, что производство электрической энергии на тепловых электростанциях осуществляется с низким КПД. Примерно 2/3 энергии, получаемой при сжигании топлива рассеивается в окружающей среде.

Удельный расход топлива и КПД генерации связаны простой зависимостью

$$B = \frac{0,123}{\eta}, \text{ кг у. т./кВт·ч.} \quad (5.2)$$

Таким образом, при калорийности энергетического угля 18,8 МДж/кг удельный расход реального топлива составляет 0,580 кг/кВт·ч.

Сложность задач, стоящих перед экономикой Украины состоит в том, что все наши отрасли производства ресурсо- и энергоемки. Для создания одного доллара ВВП в Украине используется 1 т сырья, а в США – 3 кг.

Сжигание огромного количества ископаемых топлив приводит к выбросу в атмосферу такого количества углекислого газа, которое уже не ассимилируется в процессе фотосинтеза. Это приводит к губительному изменению климата планеты. Атмосфера планеты перегревается, что уже прослеживается на всех континентах. Увеличивается количество ураганов, торнадо. Каждый год становится теплее предыдущего [46, 47, 48]. Возникает необходимость поиска путей сокращения выбросов основного компонента, обуславливающего

парниковый эффект – углекислого газа.

Следует отметить, что кроме углекислого газа парниковый эффект обусловлен наличием в атмосфере целого ряда других газов. Влияние отдельных газов на создание указанного эффекта оценить достаточно сложно, поскольку их действие не аддитивно. Так, доля действия паров воды составляет от 36 до 70%, углекислого газа от 9 до 26%, метана от 4 до 9% и озона от 3 до 7%. При этом верхняя граница соответствует действию только данного газа, нижняя – когда присутствует смесь газов [50,51].

Увеличение выработки электроэнергии на атомных электростанциях, с одной стороны, исключает эмиссию углекислого газа, а с другой стороны, увеличивает эмиссию паров воды. Это обусловлено меньшим термическим КПД атомных энергоблоков. Однако превышение эмиссии паров воды и обусловленное этим увеличение парникового эффекта все же меньше влияния эмиссии углекислого газа для традиционных тепловых электростанций. Это обусловлено тем, что время «жизни» двуокиси углерода в атмосфере составляет 130 лет, а паров воды несколько дней или недель.

Влияние различных газов на парниковый эффект существенно отличается. Всемирный институт ресурсов приводит данные по коэффициентам влияния на парниковый эффект. Они учитывают степень вредного влияния газов, как соотношение эквивалентной массы  $\text{CO}_2$  к массе данного газа. При этом общее влияние оценивается по сумме произведений массы выброса на соответствующий переводной коэффициент. Так, например эмиссия 1 кг гексафторида серы эквивалентна эмиссии 23,9 тонн двуокиси углерода (табл. 5.1)

**Таблица 5.1 - Приведенные коэффициенты эмиссии парниковых газов**

Тип парникового газа	Двуокись углерода	Метан	Закись азота	Фтор и хлор углеводород	Гексафторид серы
Коэффициент влияния на парниковый эффект	1,0	21	310	1300	23900

Наиболее предпочтительным для снижения эмиссии двуокиси углерода является широкое использование биомассы для генерации электрической энергии, теплоты и приготовления биогаза, его использования в двигателях внутреннего сгорания и бытовых условиях. В настоящее время в Англии и скандинавских странах биомасса уже широко используется на котельных установках тепловых электростанций. Начаты работы по применению древесных отходов на котельных установках и в Российской Федерации. В Англии биомасса (солома, отходы древесины и пр.) применяются в котельных установках при совместном сжигании с пылевидным углем.

Одним из доступных ресурсов является солома, которая отличается малой влагоемкостью и может быть вовлечена в производство энергии после её дробления и таблетизации. Стоимость этого продукта при разной схеме уборки урожая составляет от 55 до 70 грн/т [44].

Во многих странах мира увеличилось количество заводов по производству таблетизированного топлива из отходов древесины. Даже Россия, которая является энергонезависимой страной, построила 9 заводов по производству таблетизированного топлива.

Перспективным энергоносителем во многих районах является тополь и верболоз. Выращивание тополей попутно решает экологическую проблему. Он очищает воздух от пыли и ряда токсинов. Сообщается, что за год одно растение может вырасти на 15 – 20 мм в диаметре и 2,5 – 3,5 метра высотой. Механизированная «уборка» тополей может быть осуществлена с использованием установок размещенных на тракторах с отбором мощности [61].

В настоящее время в мировой практике произошла определённая трансформация позиций по использованию биоэнергоносителей. В начале энергоносители получали за счет использования отходов. В настоящее время в Европе фермеры активно начали выращивать энергетические культуры.

Одной из наиболее перспективных культур является мискантус – слоновая трава. Сравнение энергетических показателей этой культуры с другими, приведенные в таблице 5.2, показывает, что с ней может конкурировать только ива. Однако большая сложность выращивания и «уборки» энергетического

урожая ивы указывают на то, что другие культуры практически неконкурентоспособны по сравнению со слоновой травой. Слоновая трава является многолетним растением и требует возделывания почвы один раз в 4 года. При её выращивании решается проблема с эмиссией углекислого газа и улучшается биоразнообразие в зоне выращивания этой культуры. Удельные затраты и выход энергии при выращивании энергетических культур показаны в табл.5.2 [62].

**Таблица 5.2 - Сравнение энергетических показателей слоновой травы с другими культурами**

Культура	Потребление энергии на производство ПЭ, МДж/га	Выход энергии ВЭ, МДж/га	Соотношение ВЭ/ПЭ
Слоновая трава	9,224	300,0	32,5
Ива	6,003	180,0	30,0
Пшеница	21,46	189,34	8,8
Рапс	19,39	72,0	3,8

Важным направлением снижения эмиссии парниковых газов является уменьшение потребления энергоресурсов. Одним из альтернативных источников может быть масло масличных культур: рапса и подсолнечника. Достоинством их использования является то, что эти продукты обеспечивают независимость от внешних поставок и могут быть накоплены и использованы по мере необходимости. Это является положительной стороной этого вида топлив.

Рассмотрим техническую сторону проблемы. В настоящее время в мировой практике уже широко применяют «зеленую солярку». При использовании топлива из биологического сырья «зеленой солярки» для двигателей внутреннего сгорания возникает ряд проблем. Вязкость рапсового масла в десять раз превышает вязкость дизельного топлива. Это отрицательно влияет на топливную систему двигателя. Во время сгорания в результате малого времени пребывания в зоне

горения происходит интенсивное отложение стойкого нагара в топливной системе. При неполном окислении рапсовое масло превращается в желеобразную массу. Для обеспечения стабильной работы двигателей применяют рапсово-метиловый эфир – продукт взаимодействия рапсового масла и спирта (метилового и этилового) [52, 58, 59].

В то же время рапсовое масло может с успехом использоваться в качестве топлива на котельных.

Рапсовое масло может стабильно сжигаться в наших котлах при незначительной их доукомплектации. Несложное оборудование позволяет получать методом холодного прессования 250 кг/час рапсового масла. Указанное оборудование, учитывая его комплектность и относительно низкую стоимость, может быть размещено прямо в котельной.

## 5.2 Характеристика основных показателей теплоснабжения от тепловых электростанций

Основные показатели работы тепловых электрических станций ТЭС и ТЭЦ – зависят при прочих равных условиях (параметры теплоносителя, тип топлива, конструктивные решения, температура охлаждающей воды и пр.) Зависят от соотношения электрической и тепловой нагрузки. Увеличение выработки тепла на ТЭЦ, обеспечивает снижение удельного расхода топлива на ТЭС и соответственно повышение КПД генерации электрической энергии. Однако при эксергетическом анализе КПД не возрастает [63, 64].

Особенность работы электрических станций – практическое совпадение количества электроэнергии, что отпускается и производится, поскольку типы аккумуляторов, которые существуют в настоящее время, весьма дороги и малоэффективны. Аккумулирование тепла для технологических потребностей также практически не осуществляется.

Второе основное требование к тепло и электростанциям – экономичность. Два вида экономичности - стоимость сооружений и эксплуатационные расходы частично согласовываются между собой, частично противоречивые. В расходы



производств входят, в частности, отчисления от одноразовых расходов (капитальных вложений) на амортизацию оборудования (возобновление его работоспособности во время эксплуатации), а также сооружений. Эти отчисления тем больше, чем дороже теплоэнергетическое оборудование. В то же время основная составляющая расходов – стоимость топлива. Экономия топлива и расходов на него достигается техническим совершенствованием оборудования и, как правило, с его подорожанием. Чтобы оценить оба вида расходов на теплоэнергетическое оборудование – капитальных при ее сооружении и ежегодных при эксплуатации – часто используют обобщающий показатель общей экономичности, так называемые расчетные расходы.

В общем случае экономичность генерирующего оборудования может характеризоваться целым рядом показателей:

- коэффициентом полезного действия оборудования;
- удельным расходом топлива на произведенную электрическую энергию и тепло;
- стоимостью отпущенной тепловой или электрической энергии, относительной величиной потерь в тепловых и электрических сетях;
- рентабельностью – соотношением прибыли и стоимости основных производственных фондов и оборотных средств;
- удельными капиталовложениями на создание оборудования;
- удельной численностью персонала.

Данные основных показателей генерации тепла и электроэнергии с учетом потока энергии и эксергии приведены в прил. Д.

Для удовлетворения переменных нагрузок электростанции и энергоблоки должны обладать маневренностью, то есть способностью быстрого набора и снятия нагрузки, быстрого пуска из нерабочего состояния и остановки, без убытка для надежности и долговечности. При этом, частота электрического тока в энергосистемах должна непрерывно поддерживаться на уровне 50 Гц. Обязательным требованием, которое предъявляется к электростанции - требование безопасности работы на ней обслуживающего персонала и условий необходимых для ремонта оборудования.

Общая электрическая нагрузка промышленного района состоит преимущественно из нагрузки, связанной с обеспечением потребителя электроэнергией для производственных потребностей, повода электродвигателей железнодорожного и городского транспорта, а также с расходом энергии на освещение и бытовые потребности.

Составные части общей нагрузки изменяются как на протяжении суток, так и на протяжении года. Для пятидневной рабочей недели промышленная нагрузка является основной составляющей общей электрической нагрузки в рабочие дни недели. В воскресные и праздничные дни промышленная нагрузка резко падает, заметно уменьшая общую электрическую нагрузку.

Минимум промышленной нагрузки наблюдают обычно в ночное время, когда энергию потребляют лишь предприятия, которые работают в три смены. Наибольшая нагрузка в период от 8 до 16 часов, когда энергию подают почти всем предприятиям. В период с 16 до 24 часов нагрузка имеет промежуточное значение (энергию потребляют предприятия, которые работают в два и три изменения). Провал электрической нагрузки в дневное время связан с уменьшением потребления электроэнергии во время обеденных перерывов прил. Е.

Качественно летний суточный график промышленной нагрузки не отличается от зимнего. Осветительно-бытовая нагрузка существенно зависит от времени года и имеет наибольшее значение в вечерние часы зимой. Летом суточный максимум нагрузки (пик) снижается по абсолютному размеру и длительности и наступает позже. Осветительно-бытовая нагрузка содержит в себе также нагрузку от электробытовых приборов, которые обычно имеют резко выраженный по размеру максимум в вечерние часы. Утренний пик осветительно-бытовой нагрузки связан с увеличением электроэнергии на бытовые потребности. Суммарный график промышленной и осветительно-бытовой нагрузки имеет два максимума потребления электроэнергии на протяжении суток [64, 65].

Максимум электрической нагрузки, который наступает в зимнее время во второй половине дня, определяет общий суточный максимум электрической нагрузки и общей мощности работающих агрегатов, нужных для обеспечения

электроэнергией всех потребителей.

Анализ графиков электрической нагрузки показывает, что потребление электрической энергии происходит неравномерно. Отношение количества произведенной энергии за определенный период к тому количеству энергии, которое произвела бы электростанция за то же время, работая с максимальной нагрузкой, называется коэффициентом использования максимума –  $\mu_{\max}$ . Иногда это отношение называют также коэффициентом заполнения графика электрической нагрузки. Из этого определения vyplывает, что

$$\mu_{\max} = \frac{E}{N_{e\max} \tau_p}, \quad (5.3)$$

где  $E$  – общее количество произведенной электроэнергии, кВт·ч;

$N_{e\max}$  – максимальная нагрузка, кВт;

$\tau_p$  – количество часов работы электростанции.

Чем больше  $\mu_{\max}$ , тем полнее используют мощности оборудования. Для системы, которая объединяет большое количество электростанций, коэффициент использования максимума чаще всего значительно выше, чем для отдельных электростанций, которые работают изолированно. В больших системах коэффициент использования максимума обычно выше, чем для районных энергосистем.

Большое значение имеют годовые графики электрической нагрузки, которые составляют по данным суточных графиков. Характер годовых графиков на протяжении нескольких лет изменяется несущественно, в связи с чем облегчается задание их построения на будущий период. Годовой график нагрузки энергосистемы покрывают агрегаты и электростанции разной экономичности. Распределять суммарную нагрузку между отдельными электростанциями (агрегатами) в соответствии с общим графиком нужно так, чтобы обеспечить самую экономичную работу системы в целом. Этого можно достичь, если электростанции, которые имеют меньшие топливные и эксплуатационные расходы, будут загружать на большее количество часов использования в году, а электростанции с большими топливными и эксплуатационными расходами – на меньшее количество часов. На рис. 5.3 показан типичный график годовых

электрических нагрузок по продолжительности [63].

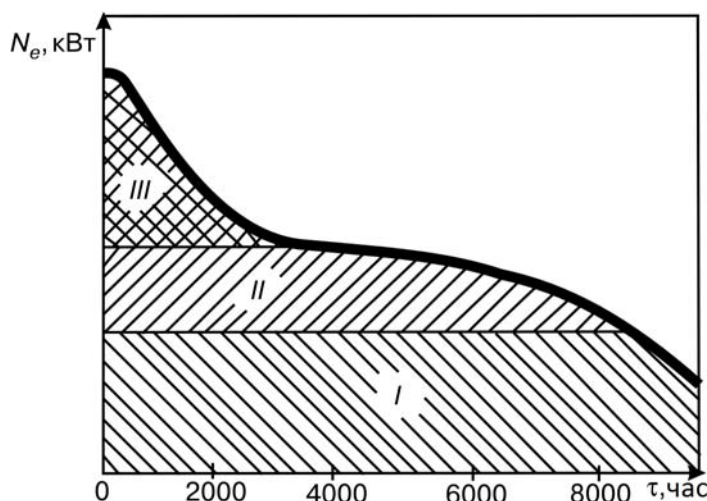


Рис. 5.3. График годовых электрических нагрузок,  $N_e$ , по продолжительности,  $\tau$ :

I – базовая нагрузка;

II – промежуточная нагрузка;

III – пиковая нагрузка

Суточный график электрической нагрузки покрывают базовые, пиковые и полупиковые электростанции (агрегаты). При этом базовые электростанции работают непрерывно с полной (номинальной) нагрузкой, а пиковые включаются только в часы, когда нужно покрывать верхнюю (III) часть графика. Полупиковые установки с уменьшением общей электрической нагрузки либо переводят на сниженные нагрузки, либо выводят в резерв. Многие агрегаты, которые несут промежуточную нагрузку, останавливают на субботу, воскресенье и праздничные дни.

Для покрытия пиковых нагрузок сооружают специальные пиковые электростанции. Их размещают вблизи потребителей и приспособляют для частого пуска и остановки. Стоимость этих электростанций должна быть значительно ниже, чем базовых, потому что количество часов использования их небольшое. КПД пиковой установки может быть невысоким, а главным требованием для них является возможность быстрого пуска и остановки [65].

Потребителей обеспечивают теплотой по графикам тепловой нагрузки. Теплота нужна для технологических процессов в промышленности, для

отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, а также для бытовых потребностей производственных, жилищных и общественных домов. Для производственных потребностей используют насыщенный пар давлением от 0,15 до 1,6 МПа. Однако, чтобы уменьшить потери во время транспортировки и избежать непрерывного дренирования воды из коммуникаций электростанции пар отпускают с небольшим перегревом. Горячую воду на отопление, вентиляцию и бытовые потребности подают с температурой от 70 до 180 °С [65].

Тепловая нагрузка ТЭЦ, обусловленная расходом теплоты на производственные процессы и бытовые потребности, практически не зависит от внешней температуры воздуха, хотя летом она несколько меньше, чем зимой. В то же время промышленная и бытовая тепловая нагрузка резко изменяется на протяжении суток. Кроме того, среднесуточная нагрузка на бытовые потребности в конце недели и в предпраздничные дни значительно выше, чем в другие рабочие дни недели.

Отопительная тепловая нагрузка, расходы теплоты на вентиляцию и кондиционирование воздуха зависят от температуры внешнего воздуха и имеют сезонный характер. Расход теплоты на отопление наибольший зимой, отсутствует в летний период, на кондиционирование воздуха теплоту тратят только летом [66].

На рис. 5.4 приведен годовой график отопительной нагрузки. Количество часов использования максимума этой нагрузки определяют из соотношения

$$\tau_{\max} = \frac{Q_p}{Q_{\max}}, \quad (5.4)$$

где  $Q_p$  – общее количество теплоты, которое отпускает ТЭЦ на протяжении года, ГДж/год;

$Q_{\max}$  – максимальная тепловая нагрузка, ГДж/год.

По аналогичным соотношениям можно определить также количество часов использования максимума отдельно для отопительно-бытовой и промышленной нагрузок. Для промышленной нагрузки  $\tau_{\max}$  может достигать 6000 ч/год, в то же время для отопительно-бытового обычно находится в пределах 2500-4000 ч/год. Следовательно, от технологической нагрузки увеличивается количество часов

использования максимума общей тепловой нагрузки. Однако для больших городских и пригородных ТЭЦ основным видом тепловой нагрузки является отопительная. Количество часов использования максимума отопительной нагрузки меньше, чем электрической.

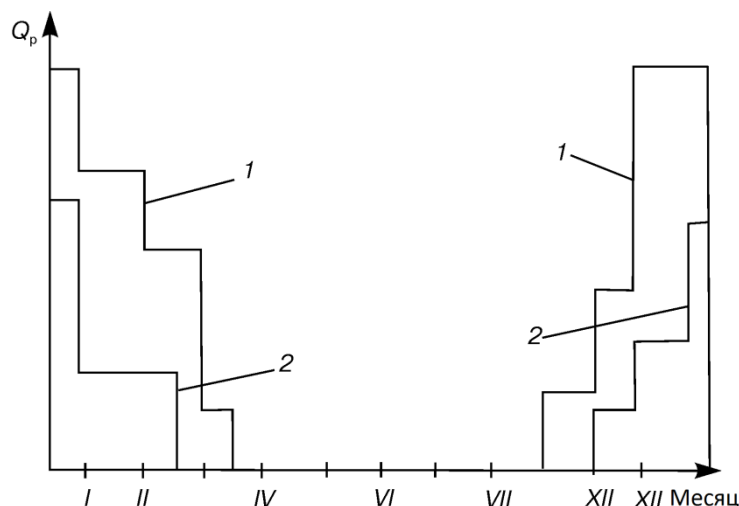


Рис. 5.4. Годовой график отопительной нагрузки:

- 1 – максимальные значения;
- 2 – минимальные значения.

Учитывая отсутствие возможности накопления электрической энергии в больших объемах, генерация и потребление энергии должны быть одновременными. Условием такого свойства является не превышение предложения над спросом, а гибкая и быстрая реакция предложения на изменение спроса. Фактически, это означает наличие неравномерного графика потребления энергии. Чем больше неравномерность графика электрической нагрузки (ГЭН), тем больше расходы топлива на генерацию энергии. Режимы неравномерной нагрузки крайне не выгодны как в энергетическом, так и в экономическом отношении.

Неравномерность ГЭН энергосистемы характеризуется коэффициентом неравномерности, что изменяется в зависимости от времени года, дня недели и других факторов [63,67]

$$\alpha = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}, \quad (5.5)$$

где  $P_{\min}$  и  $P_{\max}$  – соответственно минимальная и максимальная электрическая нагрузка.

В Украине генерация электрической энергии осуществляется атомными, тепловыми и гидроэлектростанциями. Первые два вида предприятий не приспособлены для работы в маневровом режиме. Недостаток маневровых мощностей постепенно заостряется на протяжении последних лет, что приводит к перерасходам топлива и ухудшения экологических и экономических показателей. Большинство ТЭС Украины строилось в 50-70 годы прошлого века, длительность их эксплуатации составляет от 25 до 50 лет. На сегодня основное оборудование большинства ТЭС отработало свой расчетный срок, имеет низкую экономичность и неудовлетворительные экологические показатели. Суточный график нагрузки у ОЭС Украины характеризуется резким ростом нагрузки в часы вечернего пика и значительным снижением в часы ночного провала. Да, например, в наиболее неблагоприятный рабочий день зимнего периода коэффициент неравномерности графика – отношение минимальной нагрузки в ночные часы к максимальной нагрузке в часы вечернего пика - составляет 0,74 [63].

Без наличия необходимых маневренных мощностей роста неравномерности графика нагрузки приведет к негативным последствиям, связанным с трудностями поддержки пиковых и полупиковых режимов электрических нагрузок энергосистемы страны. Практика показывает, что наиболее эффективно проблема покрытия пикового спроса на электроэнергию решается при использовании энергоустановок разного типа. Общая нагрузка графика потребления в базовой части должна покрываться, то есть обеспечиваться, высокими экономическими базовыми генерирующими установками, а в пиковой – специальными пиковыми установками.

В Украине в качестве генерирующих источников преобладают АЭС, ТЭС и ТЭЦ. Проблемы адаптации таких источников под графики нагрузки энергосистем связаны, во-первых, с необходимостью наличия на ТЭС и ТЭЦ пиковых мощностей, во-вторых, с дополнительными расходами топлива на изменения режимов их работы, в-третьих, с повышенным сносом пикового теплового

оборудования в результате многократных его пусков и остановок и, в-четвертых, с его недостаточной маневренностью [68,69,70].

Одна из особенностей эксплуатации ТЭС – непрерывность работы. Эта особенность определяется непрерывностью потребления электроэнергии. В соответствии с графиком потребления электроэнергии в принципе возможная остановка отдельных электростанций на нерабочие дни, однако, на ТЭС стараются ограничивать количество остановок, поскольку следующий пуск электростанций связан с рядом трудностей: повышением износа оборудования, уменьшение надежности его работы и перерасходами топлива.

Расходы топлива на пусковые операции существенно зависят от длительности остановки, типа остановки (холодное или горячее состояние оборудования) и типа оборудования. По данным расходов топлива на пусковые операции рассчитано количество пусковых операций и выбросы одного из самых существенных загрязнителей окружающей среды – диоксида серы [64]. Указанные данные приведены в табл. 5.3.

**Таблица 5.3 - Дополнительные годовые выбросы диоксида серы по содержанию серы в топливе 2,5 %**

№	Длительность простоя, час	Блок 300, МВт		Блок 800, МВт	
		Расходы топлива на пуск, т	Дополнительная эмиссия $\text{SO}_2$ , т/год	Расходы топлива на пуск, т	Дополнительная эмиссия $\text{SO}_2$ , т/год
1	Холодное состояние	173,7	437,7	599,3	1510,2
2	Остановка на 2 суток (50-60 час.)	158,7	799,8	448,1	2258,4
3	Остановка на сутки (12-20 час.)	136,4	343,7	430,0	1083,6
4	Ночная остановка (6-10 час.)	100,3	1783,3	276,1	4909,1



Из приведенных в табл. 5.3 данных видим, что чем меньше длительность простоя энергоблоков, тем меньше расход топлива на пуск. Да, при уменьшении времени простоя блоков 300 и 800 МВт до 6-10 часов по сравнению с их пуском из холодного состояния расходы топлива уменьшаются соответственно на 42 % и 54%.

Кроме указанных факторов, стремительный рост цен на топливо и износ большей части энергоблоков на фоне недостатка средств на реконструкцию существующих и строительство новых маневренных генерирующих мощностей Украины определяет актуальность поиска новых эффективных решений, направленных на сбалансирование отечественной энергосистемы. Практика многих зарубежных стран показывает, что одним из путей решения данного вопроса может быть использование комплекса мероприятий, направленных на управление спросом и использование более экономического и маневрового оборудования.

На сегодняшний день в Украине единственным рыночным средством экономического управления спросом на электрическую мощность являются тарифы на электроэнергию, дифференцированные по зонам суток, которые в известной мере вовлекают потребителей в «режимное» взаимодействие с энергосистемой, стимулируя их к выравниванию суточных графиков нагрузки ОЭС. Такие тарифы действуют в Украине с 1995 года. Суть регулирования графиков потребления электрической энергии предприятия заключается в переносе работы определенных процессов производства на предприятии с часов пика нагрузки в часы полупика или в часы «ночного провала». В процессе оптимизации суммарное количество потребляемой электроэнергии предприятием не изменяется. Промышленному предприятию нужно учитывать технологическую возможность смещения процессов производства на протяжении суток, необходимость выполнения производственных программ в полном объеме. Действующие на данный момент в Украине дифференцированные по времени суток тарифы на электрическую энергию должны способствовать именно выравниванию суточной неравномерности графиков нагрузки объединенной энергосистемы. Структурой электроэнергетических тарифов для промышленных

предприятий заложен мотивационный механизм регулирования энергопотребления в суточном цикле, учитывая значительную дифференциацию тарифа по зонам суток (табл. 5.4).

**Таблица 5.4 - Тарифные коэффициенты за зонами суток для промышленных предприятий согласно с постановлением НКРЭ**

Наименование показателя	Период суток	Зима	Осень-весна	Лето	Коэффициент до тарифа
Двухзонные тарифы, дифференцированные по периодам времени	Ночной	23.00-7.00	23.00-7.00	23.00-7.00	0,4
	Дневной	7.00-23.00	7.00-23.00	7.00-23.00	1,5
Трехзонные тарифы, дифференцированные по периодам времени	Ночной	23.00-6.00	23.00-6.00	24.00-7.00	0,35
	Полу-пиковый	6.00-8.00, 10.00-17.00, 21.00-23.00	6.00-8.00, 10.00-18.00, 22.00-23.00	7.00-8.00 11.00-20.00, 23.00-24.00	1,02
	Пиковый	8.00-10.00, 17.00- 21.00	8.00-10.00 18.00 -22.00	8.00-11.00, 20.00 -23.00	1,68

Оптимизация энергопотребления по такой структуре тарифа предусматривает перераспределение производительности (а одновременно и энергопотребление) со времен максимальных нагрузок в энергосистеме с повышенным уровнем тарифа на непиковые часы потребления (преимущественно часы «ночного провала»).

Экономия энергозатрат предприятия-потребителя в денежном измерении можно определить как разницу денежных расходов по оплате существующего тарифа электропотребления при условиях принудительного регулирования графика электронагрузки предприятия относительно режима нерегулированного (то есть равномерного) графика.

Для условий двухзонного тарифа оплата по равномерному графику составит

$$C_{\text{равн.}} = P_{\text{ср.}} \tau_{\text{д}} T_{\text{д}} + P_{\text{ср.}} \tau_{\text{н}} T_{\text{н}} = P_{\text{ср.}} \tau_{\text{н}} 24 [\gamma + T_{\text{н}} / 24 (\gamma - 1)], \quad (5.6)$$

где  $P_{\text{ср}}$  – величина электрической мощности равномерного графика (среднесуточное значение);

$\tau_{\text{д}}, \tau_{\text{н}}$  – тарифы соответственно дневного и ночного периодов графика нагрузки;

$T_{\text{д}}, T_{\text{н}}$  – длительность дневного и ночного периодов графика нагрузки в часах;

$\gamma = \tau_{\text{д}} / \tau_{\text{н}}$  – показатель степени дифференциации энерготарифа (отношение максимального значения тарифа в дневное время к минимальному в ночное время);

24 – количество часов в суточном цикле,  $24 = T_{\text{д}} + T_{\text{н}}$ .

Оплата по регулируемому графику при двухзонном тарифе составляет

$$C_{\text{рег}} = P_{\text{д}} \tau_{\text{д}} T_{\text{д}} + P_{\text{н}} \tau_{\text{н}} T_{\text{н}} = P_{\text{д}} \gamma \tau_{\text{н}} T_{\text{д}} + d P_{\text{д}} \tau_{\text{н}} T_{\text{н}} = P_{\text{д}} \tau_{\text{н}} (\gamma T_{\text{д}} + d T_{\text{н}}), \quad (5.7)$$

где  $P_{\text{д}}, P_{\text{н}}$  – мощности электрической нагрузки соответственно дневного и ночного периодов графика нагрузки;

$d = P_{\text{н}} / P_{\text{д}}$  – диапазон регулирования электрической нагрузки потребителем (отношение максимальной электрической мощности ночного времени к минимальной в дневной период).

Индивидуальные особенности потребителя по регулированию графика энергопотребления целесообразно определять в виде показателя диапазона регулирования  $d$ , который является обобщающей характеристикой технологических, производственных, организационных и других ограничений, которые влияют на возможность организации внепикового потребления электроэнергии.

Изменение оплаты по регулируемому графику энергопотребления найдем относительно равномерного графика, используя условие неизменности среднесуточного значения  $P_{\text{ср}}$

$$P_{\text{ср.}} 24 = P_{\text{д}} T_{\text{д}} + d P_{\text{д}} T_{\text{н}} = P_{\text{д}} (T_{\text{д}} + d T_{\text{н}}). \quad (5.8)$$

Учитывая (5.8), уравнение (5.7) для  $C_{\text{рег}}$  будет иметь вид

$$C_{\text{рег.}} = P_{\text{ср.}} \cdot \tau_n \cdot 24 (\gamma T_d + d T_n) / (T_d + d T_n). \quad (5.9)$$

Экономия энергозатрат потребителя, обусловленная разницей в оплате, выражена в относительных единицах с учетом (5.6), равняется

$$E_2 = (C_{\text{равн.}} - C_{\text{рег.}}) / C_{\text{равн.}}; \quad (5.10)$$

$$E_2 = [\gamma + T_n / 24 (\gamma - 1) - (\gamma T_d + d T_n) / (T_d + d T_n)] / [\gamma + T_n / 24 (\gamma - 1)], \quad (5.11)$$

где  $E_2$  – экономия энергозатрат по регулируемому графику в условиях двухзонного тарифа.

Для условий трехзонного тарифа будем иметь:

$$C_{\text{равн.}} = P_{\text{ср.}} \cdot \tau_p T_p + P_{\text{ср.}} \cdot \tau_{\text{нп}} T_{\text{нп}} + P_{\text{ср.}} \cdot \tau_n T_n, \quad (5.12)$$

где  $\tau_p, \tau_{\text{нп}}, \tau_n$  – тарифы соответственно пикового, полупикового и ночного периодов графика нагрузки;

$T_p, T_{\text{нп}}, T_n$  – длительность соответственно пикового, полупикового и ночного периодов графика нагрузки.

$$C_{\text{рег.}} = P_p \tau_p T_p + P_{\text{нп}} \tau_{\text{нп}} T_{\text{нп}} + P_n \tau_n T_n, \quad (5.13)$$

где  $P_p, P_{\text{нп}}, P_n$  – мощности электрической нагрузки соответственно пикового, полупикового и ночного периодов графика нагрузки. Экономия энергозатрат потребителя по трехзонному тарифу

$$\Delta C_3 = C_{\text{равн.}} - C_{\text{рег.}} = (P_{\text{ср.}} - P_p) \tau_p T_p + (P_{\text{ср.}} - P_{\text{нп}}) \tau_{\text{нп}} T_{\text{нп}} + (P_{\text{ср.}} - P_n) \tau_n T_n, \quad (5.14)$$

где  $P_{\text{ср.}} = (P_p T_p + P_{\text{нп}} T_{\text{нп}} + P_n T_n) / 24$  – среднесуточное значение графика нагрузки.

Большой популярностью у населения Украины пользуется двух- и трехзонный тариф на потребленную электроэнергию, что стимулируют уменьшение электропотребления во время пиковых суточных нагрузок электросистемы и его перенесения в зоны сниженного спроса, то есть в дневной и ночной провалы графика электрической нагрузки. Благодаря использованию таких тарифов и применению многотарифных электросчетчиков, которые имеют класс точности не менее 1,0 или 2,0, экономия средств на электроэнергию в быту может достигать в среднем 20-30%. При этом максимальная экономия у

потребителей достигается тогда, когда большая часть потребляемой электроэнергии приходится на зону низкого тарифа.

Таким образом, высокий уровень общесистемной экономической эффективности электроэнергетической системы, которая выражается в количестве и стоимости сэкономленного топлива, может быть достигнут за счет привлечения электропотребителей к регулированию (выравниванию) суточного графика нагрузок во время дневного и ночного провалов нагрузки путем стимулирования сокращения их электропотребления во время пиковых суточных нагрузок электросистемы. Такое стимулирование достигается за счет использования двух- и трехзонного тарифов на потребленную электроэнергию и установки у электропотребителей многотарифных электросчетчиков. При этом достигается существенная экономия средств на поддержку в рабочем состоянии дополнительных резервных мощностей и отменяется (или откладывается на некоторый срок) необходимость построения новых дорогих энергоблоков с высокими маневренными возможностями.

Внедрение комбинированных циклов генерации энергии требует использования в качестве энергоносителя природного газа. При высокой стоимости газа позитивные стороны резко уменьшаются [73]. Целесообразно рассматривать экономические показатели генерации с учетом топливной составляющей стоимости электрической энергии. КПД генерации электрической энергии  $\eta$  составляет

$$\eta = \frac{E}{B \cdot Q_{n(yp)}^p} = \frac{3,6}{B \cdot 29,26} = \frac{0,123}{B}, \quad (5.15)$$

где  $E$  – производство электрической энергии (1 кВт·ч = 3,6 МДж);

$B$  – удельный расход условного топлива на производство электрической энергии (кг/кВт·ч);

$Q_{n(yp)}^p$  – теплотворная способность (калорийность) условного топлива (29,26 МДж/кг).

Таким образом, стоимость топливной составляющей генерации электрической энергии  $C_{тс}$

$$C_{mc} = \frac{Q_{n(yt)}^p \cdot 0,123}{Q_{n(pm)}^p \cdot \eta}, \text{ грн/кВт·год}, \quad (5.16)$$

где  $Q_{n(pm)}^p$  – калорийность реального топлива, МДж/кг.

При современной стоимости реального твердого топлива (угля) 700 грн/т (0,7 грн/кг), его калорийность 20,9 МДж/кг (5000 ккал/кг) топливная составляющая стоимости 1кВт·час электрической энергии и  $\eta = 0,35$

$$C_{mc} = \frac{29,26 \cdot 0,123}{20,9 \cdot 0,35} \cdot 0,7 = 0,34 \text{ грн/кВт·ч.}$$

При использовании природного газа калорийностью 33,49 МДж/м<sup>3</sup>, КПД генерации 0,58 и стоимости газа \$ 500/1000 м<sup>3</sup> (5,5 грн/м<sup>3</sup>) топливная составляющая стоимости 1 кВт·час электрической энергии будет

$$C_{mc} = \frac{29,26 \cdot 0,123}{33,49 \cdot 0,58} \cdot 5,5 = 1,02 \text{ грн/кВт·ч.}$$

Таким образом, в результате существенного подорожания природного газа, его использования, даже на установках с комбинированным циклом генерации энергии приводит к увеличению топливной составляющей стоимости энергии в 3 раза.

Эффективность использования электрической энергии для отопления определяется затратами на ее производство. Затраты топлива на генерацию электрической энергии зависят от технико-экономических характеристик основного оборудования, вида топлива, климатических показателей и определяется из выражения:

$$B_o = \frac{B_{pg} \cdot N_{pg} \cdot \tau_{pg} + B_{ng} \cdot N_{ng} \cdot \tau_{ng}}{B_{pg} \cdot N_{pg} + B_{ng} \cdot N_{ng}}, \quad (5.17)$$

где  $B_{pg}, N_{pg}, \tau_{pg}$  – соответственно, удельный расход топлива, мощность генерирующего оборудования и время его работы в условиях равномерной генерации;

$B_{ng}, N_{ng}, \tau_{ng}$  – соответственно, те же показатели в условиях неравномерностей (маневренной) генерации.

Так, например, удельные расходы топлива на ТЭС при работе в разные периоды времени и сезоны года приведены в таблице 5.5.

**Таблица 5.5 - Удельные расходы условного топлива на ТЭС, т/кВт·ч**

Период года	Тарифные зоны		
	Пик	Полупик	Ночь
Осенне – зимний	538	382	369
Весенне – летний	423	371	365
Средневзвешенные за год	504,5	380,2	367,6

Известно, что соотношение между количеством теплоты, содержащихся в 1 кВтч ( $Q_3=3,6$  МДж) и произведением удельного расхода условного топлива  $B_0$  на генерацию энергии на его теплоту сгорания (29,3 МДж/кг) является КПД генерации энергии  $\eta$

$$\eta = \frac{3,6}{B \cdot 29,3} = \frac{0,103}{B}; \text{ и } B = \frac{0,103}{\eta}. \quad (5.18)$$

Графики электрической нагрузки описываются различными показателями. Неравномерность на протяжении определенного отрезка времени (чаще за сутки) характеризует коэффициент формы  $K_\Phi$ . Коэффициент формы зависит от коэффициента неравномерности  $\alpha$  (2)

$$K_\Phi = \frac{1+\alpha}{2\sqrt{\alpha}} \quad (5.19)$$

В работе [77] обоснована линейная зависимость средневзвешенного коэффициента неравномерности  $\bar{\alpha}$  графика нагрузок от среднеарифметического значения коэффициентов неравномерности в периоды утреннего полупика, утреннего пика, дневного полупика и вечернего пика. При этом

$$B_{op} = \frac{0,123}{\eta} (K_\Phi - \bar{\alpha}). \quad (5.20)$$

Общая зависимость удельных затрат топлива с учетом неравномерности графика электрических нагрузок имеет вид

$$B_0 = \frac{0,123}{\eta} \left[ 1 + \left( \frac{1+\alpha}{2\sqrt{\alpha}} - 0,416\alpha - 0,584 \right) \right]. \quad (5.21)$$

При  $\alpha \rightarrow 1$ , последняя зависимость стремится к  $\frac{0,123}{B}$ . Нетрудно убедиться, что уменьшение  $\alpha$ , например до 0,5, приводит к увеличению удельных расходов топлива в 1,27 раза. Графики электрических нагрузок показывают, что самый большой «провал» происходит в ночное время.

Одним из методов сглаживания графика электрических нагрузок есть более широкое применение когенерационных установок и применение тепловых аккумуляторов.

В тепловых аккумуляторах обеспечивается качественная теплоизоляция баков. Температура воды в верхней части бака поддерживается на уровне 98°C. Таким образом, обеспечивается заполнение верхней части баков водяным паром (поддерживается паровая "подушка"), которая практически исключает насыщение воды кислородом и, соответственно, снижает интенсивность кислородной коррозии. Верхняя часть бака оборудована гидрозатвором для защиты от избыточного давления. На большей части систем теплоснабжения в Европе оптимальное время работы тепловых аккумуляторов составляет 7 часов в ночное время.

В условиях, когда электрическая нагрузка оборудования существенно снижается. Это приводит к падению давления в отборах турбин и снижению тепловой нагрузки основного оборудования. Использование когенерации обеспечивает выработку тепла с высоким КПД в ночное время. Примером может быть установка в Кореи (CheongSoo Project). Когенерационная установка состоит из двух двигателей Wartsila 20V34 SG, оборудованных теплообменниками для рекуперации тепла и его использования в системе теплоснабжения. Установка обеспечивает теплоснабжение пригодной зоны площадью приблизительно 3 км<sup>2</sup>. Основные показатели работы установки:

- электрическая мощность - 16,9 МВт;
- КПД генерации электроэнергии - 43,4%;
- производительность установки по выработке тепловой энергии:  
летом - 14,2 МВт, зимой - 3,6 МВт;
- общая эффективность летом - 80 %;
- объем бака аккумулятора - 3000 м<sup>3</sup>.



При разнице температур воды между горячей водой в аккумуляторе и возвращенной водой из теплосети удельная плотность аккумулирования тепла составляет 53 кВтч/м<sup>3</sup> бака-аккумулятора. Следует отметить, что при увеличении объема баков-аккумуляторов больше 1000 м<sup>3</sup> растут удельные расходы на металлические баки, поскольку увеличивается объем капиталовложений на оборудование баков, которые находятся под давлением [74].

### 5.3. Применение аккумуляторов теплоты в теплогенерирующих системах теплоснабжения

Одним из перспективных направлений является использование для теплоснабжения электрической энергии, потребляемой во внепиковые периоды времени. При этом необходима компактная и надежная система аккумулирования тепла.

В мировой практике предпочтение отдают тепловым аккумуляторам с использованием зернистого теплоносителя. Масса или объем теплоаккумулирующего материала (ТАМ) зависит от соответствующей плотности запасаемой энергии и КПД процесса аккумулирования тепла. В реальном процессе аккумулирования теплоты плотность запасаемой энергии на порядок ниже теоретического значения вследствие тепловых потерь, выравнивания поля температур, потерь при заряде и разряде аккумулятора. В настоящее время известно большое многообразие видов и конструкций тепловых аккумуляторов с зернистым ТАМ, обусловленное широким спектром областей применения аккумуляторов тепла. Множество методов и способов аккумулирования приводит к различным техническим и конструктивным решениям:

- тепловые аккумуляторы с твердым ТАМ;
- тепловые аккумуляторы с плавящимся ТАМ;
- жидкостные аккумуляторы тепла;
- паровые аккумуляторы тепла;
- термохимические аккумуляторы;
- тепловые аккумуляторы с электронагревательным элементом;

- тепловые аккумуляторы с фазовым переходом в теплоносителе.

Традиционно рассматриваются тепловые аккумуляторы с неподвижной или подвижной матрицей. Использование неподвижной матрицы обеспечивает максимальную простоту конструкции, но требует больших масс ТАМ. Кроме этого, температура теплоносителя на выходе из аккумулятора изменяется в течении времени, что требует дополнительной системы поддержания постоянных параметров путем перепуска. Канальные тепловые аккумуляторы широко применяются в системах электро-, теплоснабжения, использующих внепиковую энергию.

Теплоаккумулирующий материал (шамот, огнеупорный кирпич и т.п.) нагревается в периоды минимального потребления электроэнергии, что позволяет выравнивать графики загрузки электростанций. Пропуская холодный воздух через матрицу, можно производить обогрев помещений. Аккумуляторы данного типа производятся за рубежом серийно для индивидуальных и малосемейных домов. Особым типом канальных тепловых аккумуляторов с твердым ТАМ являются тепловые графитовые аккумуляторы, используемые в качестве источника энергии в автономных энергоустановках. Температура их нагрева может достигать 3500 °К, что обеспечивает приемлемые массогабаритные характеристики установки.

Подземные аккумуляторы тепла с горизонтальными каналами применяются для аккумуляирования тепла и его использования в течение 2–4 месяцев. Аккумуляторы тепла в водоносных горизонтах используются для аккумуляирования количества тепла, достаточного для теплоснабжения небольшого поселка в течение года. Здесь в качестве ТАМ используется водопроницаемый слой земли, в который в режиме заряда через скважину закачивается горячая вода, а в режиме разряда через другую скважину закачивается холодная вода. Вследствие отсутствия поверхностей теплообмена данный тип тепловых аккумуляторов обеспечивает наилучшие экономические характеристики среди подземных аккумуляторов тепла.

Очевидно, что недостатками таких видов аккумуляторов являются сложность проектирования для конкретного вида водоносного горизонта, большие

энергетические затраты на прокачку теплоносителя. Использование подвижной матрицы предполагает применение тепловых аккумуляторов, как правило, в виде вращающегося регенератора, устройств с падающими шарами и т.п. Такие аккумуляторы применяются в аппаратах регенерации тепловой энергии и, вследствие малой продолжительности рабочего цикла, они имеют небольшие конструктивные размеры. Для тепловых аккумуляторов с подвижной матрицей характерна постоянная температура газа на выходе. Основные показатели аккумуляторов тепла с твердым ТАМ определяются в зависимости от их конструктивных решений и назначения. При этом принимаются допущения о равномерности распределения потоков теплоносителей по площади матрицы, независимости свойств ТАМ и теплоносителей от температуры и ряд других. При использовании теплоты плавления некоторых веществ для аккумуляирования теплоты обеспечивается высокая плотность запасаемой энергии, небольшие перепады температур и стабильная температура на выходе из теплового аккумулятора. Несмотря на это, большинство ТАМ в расплавленном состоянии являются коррозионно-активными веществами, в большинстве своем имеют низкий коэффициент теплопроводности, изменяют объем при плавлении и относительно дороги. В настоящее время известен достаточно широкий спектр веществ, обеспечивающих температуру аккумуляирования от 0 до 1400°C. Необходимо отметить, что широкое применение тепловых аккумуляторов с плавящимся ТАМ сдерживается, прежде всего, соображениями экономичности создаваемых установок. При небольших рабочих температурах (до 120°C) рекомендуется применение кристаллогидратов неорганических солей, что связано, в первую очередь, с использованием в качестве ТАМ природных веществ. Для реального применения рассматриваются только вещества, не разлагающиеся при плавлении либо растворяющиеся в избыточной воде, входящей в состав ТАМ.

Использование органических веществ полностью снимает вопросы коррозионного разрушения корпуса, обеспечивает высокие плотности запасаемой энергии, достаточно хорошие технико-экономические показатели. Однако в процессе работы теплового аккумулятора с органическими ТАМ происходит

снижение теплоты плавления вследствие разрушения протяженных цепочек молекул полимеров. Из-за низкого коэффициента теплопроводности органических ТАМ требуется создание и применение развитых поверхностей теплообмена, что, свою очередь, накладывает конструктивные ограничения на использование теплового аккумулятора. При рабочих температурах от 500 до 1600 °С применяются, как правило, соединения и сплавы щелочных и щелочноземельных металлов [73, 75].

Существенным недостатком применения соединений металлов принято считать низкий коэффициент теплопроводности, коррозионную активность, изменение объема при плавлении. Для защиты от химической коррозии, очевидно, необходимо подобрать конструкционные материалы или ингибиторы коррозии, обеспечивающие заданный срок службы теплового аккумулятора.

Перспективно использовать смеси и сплавы органических и неорганических веществ, позволяющие обеспечивать необходимые значения температур плавления и большие сроки службы. Применение разнообразных теплоаккумулирующих материалов требует разработки надежных конструктивных решений, направленных на максимальное использование положительных качеств ТАМ и исключение их недостатков (Рис. 5.5).

Размещение ТАМ в капсулах (Рис. 5.5 а) обеспечивает высокую надежность конструкции, позволяет создавать развитую поверхность теплообмена, компенсировать (при использовании гибких капсул) изменение объема в процессе фазовых переходов. Однако вследствие низкой теплопроводности ТАМ необходимо большое число капсул малого размера, что приводит к большой трудоемкости изготовления теплового аккумулятора.

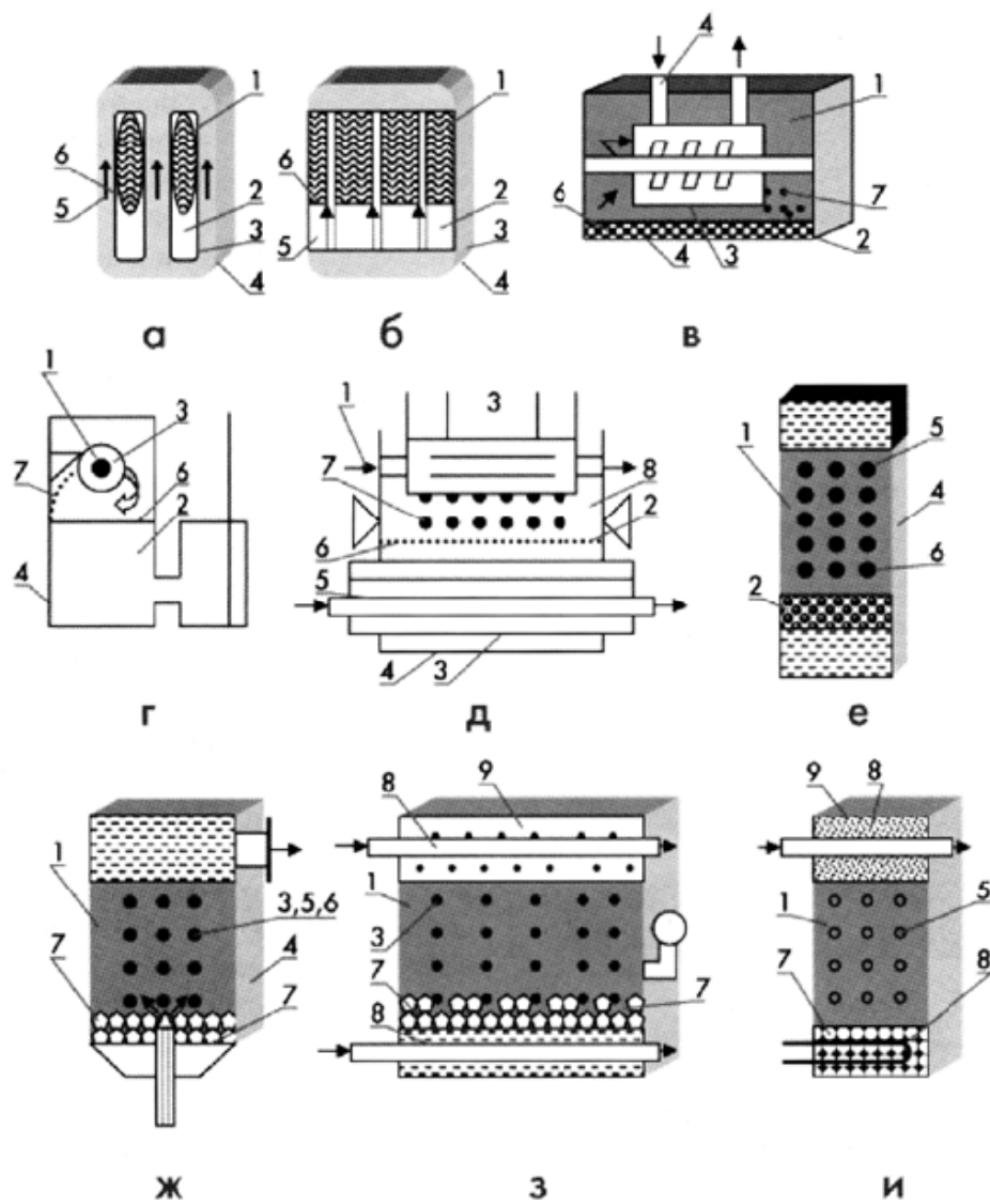


Рис. 5.5. Основные типы тепловых аккумуляторов фазового перехода:

а — капсульный;

б — кожухо-трубный;

в, г — со скребковым удалением ТАМ;

д — с ультразвуковым удалением ТАМ;

е, ж — с прямым контактом и прокачкой ТАМ;

з, и — с испарительно-конвективным переносом тепла;

1 — жидкий ТАМ; 2 — твердый ТАМ;

3 — поверхность теплообмена; 4 — корпус теплового аккумулятора;

5 — теплоноситель; 6 — граница раздела фаз; 7 — частицы твердого ТАМ;

8 — промежуточный теплообменник; 9 — паровое и жидкостное пространства для теплоносителя.

Поэтому целесообразным является применение капсульных тепловых аккумуляторов в случаях малых тепловых потоков, отводимых теплообменной поверхностью. Расположение ТАМ в межтрубном пространстве кожухо-трубного теплообменника (Рис. 5.5 б) обеспечивает рациональное использование внутреннего объема теплового аккумулятора и применение традиционных технологий изготовления теплообменных аппаратов. Однако при такой конструкции затруднено обеспечение свободного расширения ТАМ, вследствие чего понижена надежность аккумулятора в целом. Самым технологически сложным и дорогим элементом теплового аккумулятора традиционной конструкции является теплообменная поверхность. Вследствие низких коэффициентов теплопроводности большинства плавящихся ТАМ, в настоящее время предложены различные способы уменьшения поверхности теплообмена путем соскребания ТАМ (Рис. 5.5 в, 1 г), путем ультразвукового либо электрогидравлического разрушения затвердевшего ТАМ (Рис. 5.5 д). Указанные выше способы позволяют существенно снизить величину термического сопротивления теплообменной поверхности, но в то же время они в несколько раз увеличивают нагрузки на конструктивные элементы аккумулятора. Известно, что лучшим вариантом теплообменной поверхности является ее полное отсутствие, т. е. непосредственный контакт теплоаккумулирующего материала и теплоносителя. Очевидно, что в этом случае необходимо подбирать как теплоаккумулирующие материалы, так и теплоносители по признакам, обеспечивающим работоспособность конструкций. Теплоаккумулирующие материалы в этом случае должны отвечать следующим требованиям:

- кристаллизоваться отдельными кристаллами;
- иметь большую разность плотностей твердой и жидкой фаз;
- быть химически стабильными;
- не образовывать эмульсий с теплоносителем.

Теплоносители подбираются по следующим признакам:

- химическая стабильность в смеси с ТАМ;
- большая разница плотностей по отношению к ТАМ;
- малая способность к вспениванию;

- и ряд других требований, вытекающих из особенностей конструкции.

При использовании более плотного теплоносителя, чем твердый ТАМ, реализуется схема, изображенная на рис. 5.5 е. В процессе работы аккумулятор заполнен смесью теплоаккумулирующего материала и теплоносителя. В верхнюю часть теплового аккумулятора подается жидкий теплоноситель, который попадает на поверхность ТАМ, охлаждает (нагревает) его и отводится из нижней части аккумулятора. За счет меньшей плотности жидкой фазы ТАМ, по сравнению с твердой, его закристаллизовавшиеся частицы опускаются в нижнюю часть аккумулятора. В дальнейшем происходит постепенное заполнение всего объема закристаллизовавшимся ТАМ. При использовании теплоносителя с плотностью, меньшей плотности ТАМ, реализуется схема, изображенная на рис. 5.5 ж. Распыление теплоносителя происходит в нижней части аккумулятора. В процессе всплытия капель теплоносителя ТАМ нагревается либо охлаждается и одновременно интенсивно перемешивается. Очевидно, основными недостатками приведенных способов контакта ТАМ и теплоносителя являются потребности в постороннем источнике энергии для прокачки и необходимость тщательной фильтрации теплоносителя с целью препятствия уносу частиц ТАМ. Указанные недостатки отсутствуют в конструкции, использующей принцип испарительно-конвективного переноса тепла при непосредственном контакте ТАМ и теплоносителя (Рис. 5.5 з). Для обеспечения работоспособности теплового аккумулятора необходимо, чтобы температура кипения теплоносителя при атмосферном давлении была несколько ниже температуры плавления ТАМ. Для заряда аккумулятора давление и, соответственно, температура кипения теплоносителя в нем устанавливаются выше температуры плавления ТАМ. В зарядном теплообменнике осуществляется подвод тепла. Теплоноситель закипает, и пузырьки пара при температуре выше температуры плавления ТАМ поднимаются вверх и подогревают ТАМ. При этом происходит плавление ТАМ и конденсация теплоносителя. Расплавленный ТАМ поднимается вверх, а конденсат теплоносителя опускается вниз. По мере плавления ТАМ пузырьки теплоносителя выходят в паровое пространство теплового аккумулятора, и в конце процесса зарядки теплоноситель в паровой фазе находится в паровом пространстве. На

этапе отвода тепла от теплового аккумулятора давление в нем снижается так, что температура конденсации теплоносителя становится ниже температуры плавления ТАМ. При отводе тепла на поверхности разрядного теплообменника происходит конденсация теплоносителя, который стекает на расплавленный ТАМ. В результате происходит испарение капель теплоносителя и кристаллизация частиц ТАМ. Затвердевший ТАМ опускается в нижнюю часть теплового аккумулятора, а пар теплоносителя поднимается вверх. По мере охлаждения ТАМ капли теплоносителя опускаются все ниже и ниже, и в конце разрядки весь теплоноситель оказывается в нижней части теплового аккумулятора. Наибольшее распространение получили жидкостные тепловые аккумуляторы [17,18,75]. Паровые тепловые аккумуляторы конструктивно могут быть выполнены в виде:

- стального цельносварного корпуса;
- сосуда из предварительно напряженного железобетона или чугуна;
- подземного резервуара высокого давления.

Большие габариты, значительная трудоемкость и сложность в изготовлении, затрудненный контроль и осмотр (при подземном размещении) тепловых аккумуляторов такого типа препятствует их широкому распространению. Использование термохимических циклов в тепловых аккумуляторах основывается на принципе возникновения химического потенциала в результате обратимой химической реакции в неравновесном состоянии. Важным преимуществом химических способов аккумуляции тепловой энергии, по сравнению с обычными, является то, что запасенная энергия может храниться достаточно длительное время без применения тепловой изоляции, облегчены проблемы транспорта энергии на значительные расстояния. Конструкция теплового аккумулятора с тепловыми трубами к теплогенерирующей установке приведена на рис. 5.6. Тепловой аккумулятор устанавливается в хвостовой части котла: в газоход помещаются испарительные части тепловых труб, а конденсаторы размещены в зернистой массе. Между подводящими теплоту тепловыми трубами установлены также тепловые трубы, отводящие теплоту от зернистой массы. К преимуществам использования в качестве теплообменных поверхностей тепловых



аккумуляторов тепловых труб следует отнести простоту компоновки, надежность и стабильность работы, меньшие гидравлические потери в газовом тракте.

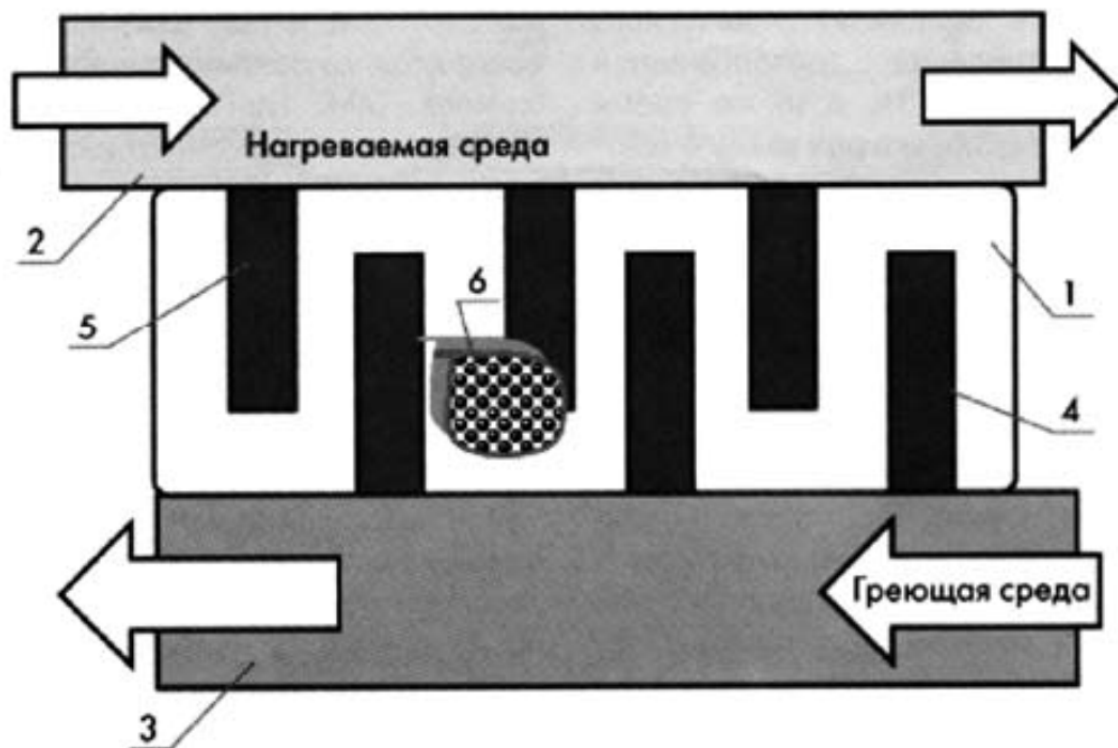


Рис. 5.6. Конструкция теплового аккумулятора с тепловыми трубами:

- 1 - тепловой аккумулятор с зернистой матрицей;
- 2 - коллектор с нагреваемой средой;
- 3 - коллектор-газоход с греющей средой;
- 4, 5 - подводящие и отводящие теплоту тепловые трубы соответственно;
- 6 - зернистая масса.

Таким образом, применение аккумуляторов теплоты в системах теплоснабжения позволит повысить эффективность использования топлива, шире применять вторичные энергоресурсы, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии.

При аккумулировании теплоты, основанном на использовании обратимого процесса фазового перехода плавления-затвердения, в качестве ТАМ используется фазоизменяющий материал (ФИМ). В таких АТ, называемых аккумуляторами теплоты на фазовых переходах (АФП), на единицу объема запасается намного большее количество теплоты, чем в водных аккумуляторах.

При этом процесс зарядки и разрядки может быть осуществлен в узком температурном диапазоне, что оказывается очень важным при необходимости работы АТ в условиях небольших температурных напоров.

Способ аккумулирования термохимической теплоты основан на использовании обратимых химических реакций. Основным критерием тепловой эффективности АТ является удельная величина теплоты, которая запасается. В зависимости от назначения оборудования ее целесообразно рассматривать отнесенную к массе или объему.

Аккумуляирование физического тепла является наиболее применяемым. Достаточно низкая теплоемкость аккумулятора должна компенсироваться использованием больших объемов теплоаккумулирующих материалов. Как аккумуляторы используют теплоизолированные резервуары воды.

Аккумуляторы, которые используют тепловые эффекты обратимых фазовых переходов, характеризуются более высокой плотностью энергии тела при небольшом объеме теплоаккумулирующего материала и имеют практически постоянную температуру разряда. Теплоаккумуляторы с фазовым переходом разделяются на низкотемпературные (до 120<sup>0</sup>С), среднетемпературные (120 – 400<sup>0</sup>С) и высокотемпературные (400 – 1000<sup>0</sup>С). Основные их параметры приведены в таблице 5.6.

**Таблица 5.6 - Основные параметры теплоаккумуляторов с фазовым переходом [19]**

Теплоаккумулирующие материалы	Диапазон температуры плавления, °С	Объемная плотность аккумулированной энергии, МДж/м <sup>3</sup>
Гидраты солей и их смеси	30 – 50	200 – 400
Органические соединения	30 – 60	150 – 200
Соли	140 – 1000	300 – 1900
Металлы и их сплавы	270 – 1000	540 – 3000
Щелочи	300 – 500	1280

АТ находят применение в разных отраслях хозяйства. Основными сферами

использования АФП являются:

- энергетика, в том числе альтернативная: солнечная энергетика, использование на теплоэлектростанциях в качестве резервных накопителей теплоты;
- строительство: в системах отопления и охлаждения воздуха, для улучшения тепловой эффективности настенных панелей;
- в системах утилизации сбросной теплоты другое.

Для АФП разного назначения в качестве ТАМ применяются вещества разных классов. В высоко- и среднетемпературных АФП могут использоваться металлы и соли, которые владеют достаточно высокой температурой плавления. В то же время необходимо следить за тем, чтобы через влияние ТАМ не происходило разрушение конструкции. Из металлов могут применяться, например, алюминий, олово и другое. Следует отметить один недостаток алюминия: в жидком состоянии он растворяет железо, поэтому не должен контактировать со сталью.

Из солей можно использовать  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaBO}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{KF}$ . Соли фтора  $\text{NaF}$ ,  $\text{MgF}$ ,  $\text{LiF}$  имеют большую удельную энтальпию фазового перехода -  $\Delta H_f \sim 103$  кДж/кг, что является очень позитивным решением для использования их в АФП. Температуры плавления у них лежат в пределах от  $900^\circ\text{C}$  до  $1100^\circ\text{C}$ . В качестве ТАМ для среднетемпературных АФП могут применяться, например,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  или легкоплавкие металлы и сплавы.

ТАМ, применяемые в низкотемпературных АФП относятся в основном к двум классам веществ, это – кристаллогидраты солей и органические вещества, в первую очередь парафин. Однако существенным недостатком кристаллогидратов является нестабильность свойств в процессе плавления-затвердения и склонность к химическим превращениям.

В системах аккумулирования высокотемпературной теплоты обеспечивают достаточно высокую удельную энергию, сравнимую с удельной энергией электрических батарей. Основным их недостатком является сложность в достижении соответствующей теплоизоляции аккумуляторных резервуаров. Аккумулирование теплоты обычно не нуждается в дорогих резервуарах высокого

давления, но, из другой стороны, необходимо значительно больше объем теплоносителя для сохранения заданного количества энергии.

Еще одним способом аккумулирования теплоты является использование отличий в физическом состоянии вещества, которые заключаются во внешнем влиянии на вещество с целью вызывать его переход из твердой фазы в жидкую или из жидкой в парообразную. При подобном изотермическом превращении состояния вещества либо поглощается, либо выделяется определенное количество теплоты в зависимости от того, в каком направлении оно происходит. Такая теплота называется скрытой теплотой фазового превращения. Некоторые специфические формы изменения состояния вещества, такие как плавление, конденсация, испарение и другие также связаны с поглощением или выделением теплоты. Для большинства химически чистых веществ их превращения не связаны со значительным выделением (или поглощением) теплоты.

Существует категория веществ, называемых гидратами, которые удовлетворяют всем необходимым требованиям. Гидратами называются химические соединения, в которых молекулы воды занимают определенные места в кристаллической решетке. Для того чтобы такие химические соединения расплавить, нужно достаточно большое количество энергии. В процессе плавки вода коагулирует, вещество растворяется в этой воде и образуется так называемый гидратный раствор. В табл. 5.7 приведены некоторые гидратные вещества.

**Таблица 5.7 - Свойства гидратов – перспективных аккумуляторов тепла**

Тип гидрата	Теплота плавления $Q_{пл}$ , кДж/кг	Температура плавления $t_{пл}$ , °C	Удельная теплоемкость $C$ , кДж/кг °C		Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
			твердая фаза	жидкая фаза	
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 12H_2O$	260	88	0,46	0,83	1,56
$NaC_2H_3O_2 \cdot 3H_2O$	264	58	0,50	1,0	1,30
$LiNO_3 \cdot 3H_2O$	306	30	0,58	0,94	1,44
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	244	31,8	0,54	1,00	1,58
$1(Na_2SO_4 \cdot 10H_2O) + 1,5(NH_4Cl)$	162	11	0,41	0,77	1,41

Многие из них имеют точки плавления в подходящем диапазоне и имеют достаточно высокую теплоту плавления, что представляет интерес с точки зрения использования в системах аккумулирования энергии. Эти вещества достаточно распространены и не представляют особой опасности для окружающей среды. Гидраты применяются для аккумулирования энергии во многих солнечных отопительных установках, примененных в жилищном секторе. Проблемы накопления и сохранения тепла, как и ранее актуальны, и очень привлекательно решать их с помощью не простого нагревания какого-нибудь теплоемкостного тела, а с использованием физических особенностей перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое. К сожалению, число веществ, которые изменяют свое агрегатное состояние в диапазоне температур 40-70 °С не так большое. Да и те - достаточно дорогие. Это прежде всего - парафин. Но, есть и другие вещества, например сульфат натрия или глауберова соль [19].

Глауберова соль –  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , десяти водный кристаллогидрат (декагидрат) сульфата натрия. В десятиводном сульфате натрия каждая его молекула «связывает» вокруг себя 10 молекул воды. В результате этого сульфат натрия начинает растворяться в собственной воде с ростом температуры с большим поглощением тепла. При температуре 32 °С он становится густой жидкостью. А при охлаждении ниже этой температуры может начать кристаллизироваться и отдавать тепло назад. Количество тепла достаточно большое – 78,5 кДж / моль.

Общая схема экспериментального оборудования представлена на рис. 5.7.

Глауберова соль используется в обезвоженном виде (иначе ее было бы очень тяжело хранить). Приготовление раствора осуществлялось следующим образом: в 750 мл воды при температуре 60 °С растворяли сульфат натрия к состоянию насыщенного раствора (то есть до тех пор, пока соль не перестанет растворяться). В 750 мл воды растворилось приблизительно 250-300 г соли. Плотность сульфата натрия - приблизительно 1,5 кг/л.

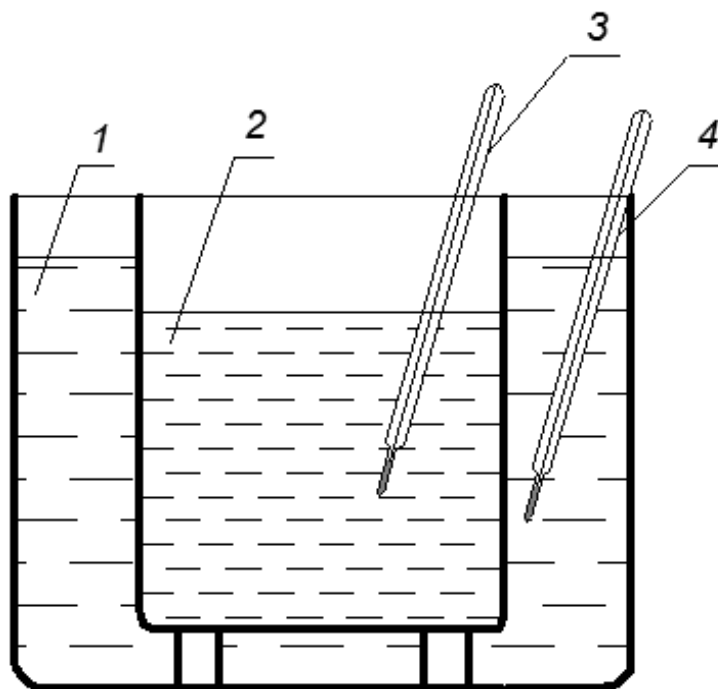


Рис. 5.7 Схема экспериментального оборудования:

- 1 – емкость с водой, воспринимающая тепло;  
 2 – емкость с водой или раствором, отдающая тепло;  
 3,4 – ртутный термометр.

Для определения количества аккумулированной теплоты емкость с раствором сульфата натрия размещалась в емкости с водой объемом 2,5 л, которая поглощала теплоту в процессе кристаллизации. Начальная температура воды, которая воспринимала теплоту составляла 15<sup>0</sup>С. Контроль температуры проводился с помощью лабораторного ртутного термометра. На протяжении 30 мин. через каждые 5 мин. измерялась температура охлаждения раствора и нагревания воды (табл. 5.8).

**Таблица 5.8 - Результаты эксперимента аккумулирования тепла на основе раствора сульфата натрия**

Длительность, мин	Температура воды объемом 2,5 л, °С	Температура раствора сульфата натрия объемом 0,75 л, °С
1	2	3
В начале	15	60
1	17	50
5	18	45

Продолжение таблицы 5.8

1	2	3
10	19	40
15	20	35
20	20	30
25	21	27
30	21	25

Также проводился эксперимент аккумуляции тепла с водой. Нагретая вода до 60°C объемом 0,75 л размещалась в емкости с водой объемом 2,5 л, которая поглощала теплоту. Начальная температура воды, которая воспринимала теплоту составляла 15 °С. Контроль температуры проводился с помощью лабораторного ртутного термометра. На протяжении 10 мин. через каждую минуту измерялась температура охлаждения воды и нагревания воды (табл. 5.9). Результаты экспериментов представлены на рис. 5.8.

**Таблица 5.9 - Результаты эксперимента аккумуляции тепла с водой при начальной температуре 60°C**

Длительность, мин	Температура воды объемом 2,5 л, °С	Температура воды объемом 0,75 л, °С
В начале	15	60
1	16	50
2	17	46
3	18	43
4	19	40
5	20	38
6	21	35
7	22	33
8	22	30
9	23	27
10	23	25

Как видим, первый график – график охлаждения воды здесь вода остывает, стремясь к температуре окружающего ее воздуха. Второй – это график охлаждения насыщенного раствора сульфата натрия. Для того, чтобы началась естественная кристаллизация в растворе, необходимо наличие какой-либо

неоднородности. Обычно ею служит некоторое количество нерастворенной соли на дне сосуда. То есть раствор немного пересыщен. Тепло, которое выделяется при кристаллизации, нагревало сам раствор и компенсировало теплопотери. Третий – это график температуры воды, которую воспринимало тепло в процессе кристаллизации раствора сульфата натрия.

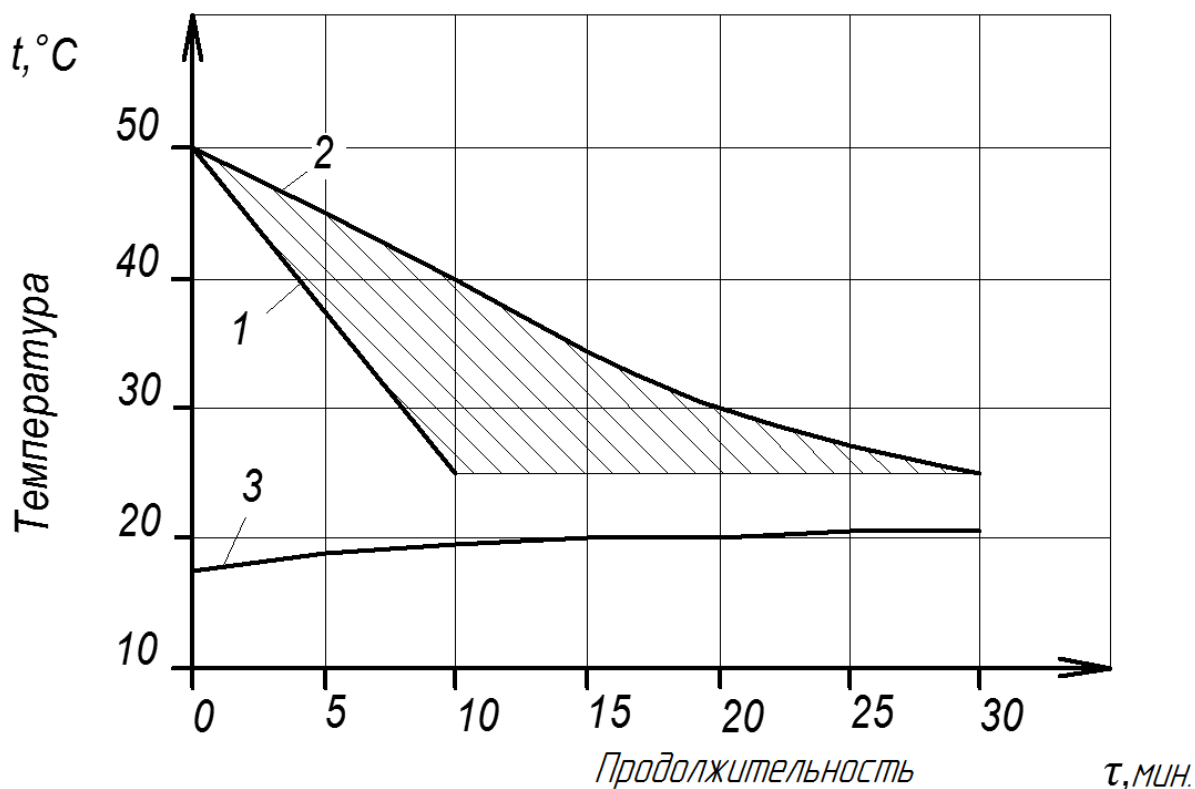


Рис. 5.8 Аккумулирование тепла на основе раствора сульфата натрия:

1 – охлаждение воды;

2 – охлаждение  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (340 г/кг);

Соотношение объемов, отдающего и воспринимающего тепло – 1:3,3;

3 – температура воды, воспринимающей тепло.

Таким образом, можно сделать вывод, что теплоаккумулятор с использованием раствора сульфата натрия обеспечивает значительно больше количество накопленного аккумулятора тепла, практически в 2-3 раза, в сравнении с простой водой.

Выполнены эксперименты с использованием в качестве аккумулирующего вещества насыщенного раствора сульфата алюминия. Сульфат алюминия – это соль белого цвета с серым, голубым или розовым оттенком, при обычных



условиях существует в виде кристаллогидрата  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  - бесцветных кристаллов. Хорошо растворяется в воде.

Насыщенный раствор сульфата алюминия готовился путем растворения в 750 мл воды приблизительно 400-450 г соли. Плотность сульфата алюминия - приблизительно 1,5 кг/л.

Эксперимент проводился аналогично предыдущему. Результаты экспериментов при аккумулировании тепла растворами сульфата алюминия приведены в табл. 5.10 и 5.11.

**Таблица 5.10 - Результаты эксперимента аккумулирования тепла на основе раствора сульфата алюминия при соотношении объемов 1:3,3**

Длительность, мин	Температура воды объемом 2,5 л, °С	Температура раствора сульфата алюминия объемом 0,75 л, °С
В начале	15	80
1	17	70
10	19	65
20	20	60
30	22	50
40	20	40
50	20	35
60	22	30
70	20	25

Вода, воспринимающая тепло через каждые 20 мин. охлаждалась до 20 °С. Аналогично проводился эксперимент при объеме раствора сульфата алюминия 0,4 л и воды, что воспринимает тепло тоже 0,4 л (табл. 5.11).

**Таблица 5.11 - Результаты эксперимента аккумулирования тепла на основе раствора сульфата алюминия при соотношении объемов 1:1**

Длительность, мин	Температура воды объемом 0,4 л, °С	Температура раствора сульфата алюминия объемом 0,4 л, °С
В начале	15	80
1	18	70
10	19	65
20	20	60
30	22	55
40	20	50
50	23	45
60	20	35
70	22	25

Также проводился эксперимент аккумулирования тепла с водой. Результаты экспериментов представлены на рис. 5.9. Как видим, первый график – это график охлаждения воды, здесь вода остывает, стремясь к температуре окружающего ее воздуха. Второй и третий – это графики охлаждения насыщенного раствора при разном соотношении объемов воды, что отдает и воспринимает тепло. Четвертый – это график температуры воды, воспринимающей тепло в процессе кристаллизации раствора сульфата алюминия.

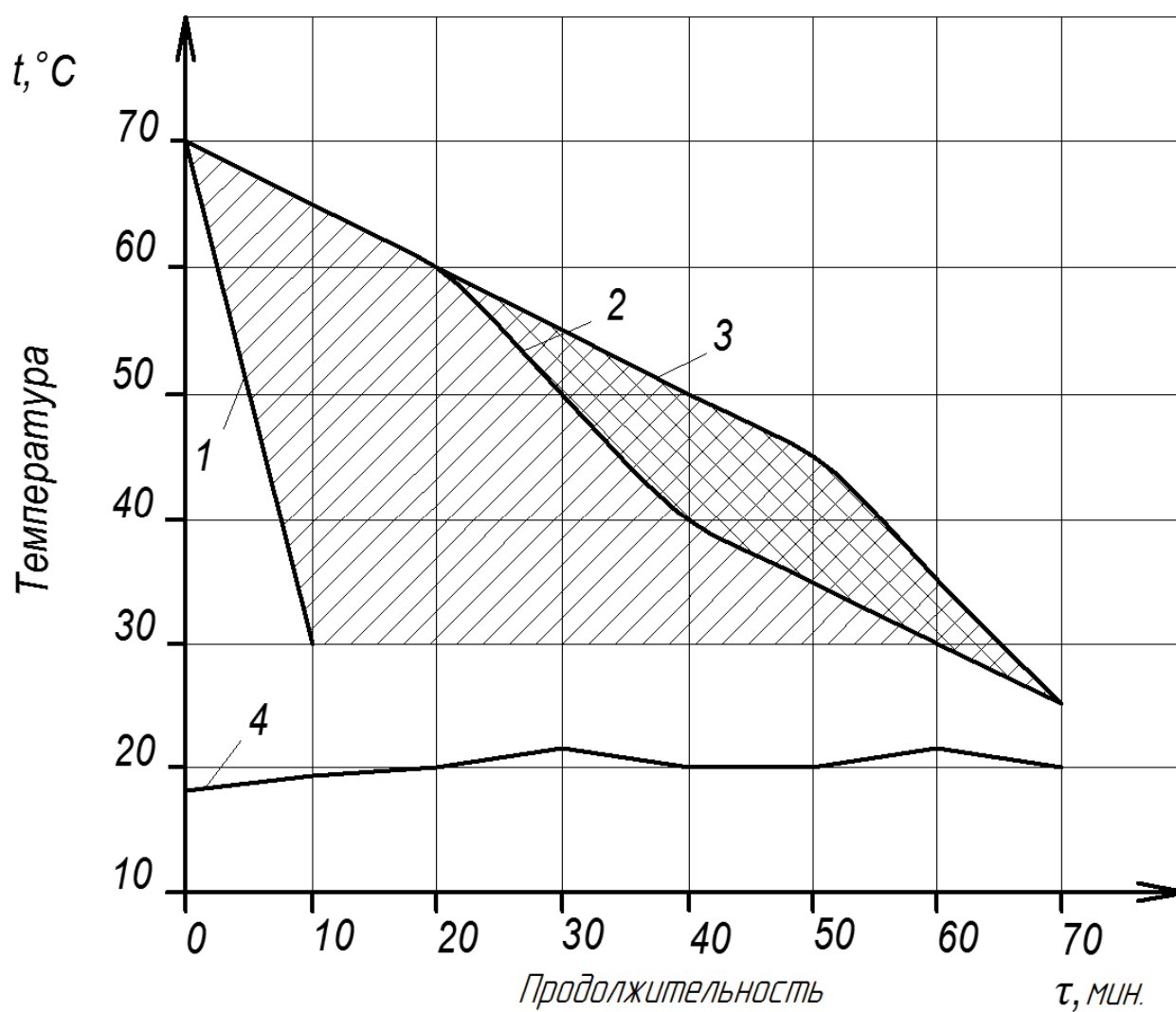


Рис. 5.9. Аккумуляция тепла на основе раствора сульфата алюминия:

1 – охлаждение воды;

2,3 – охлаждение  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  (400г/кг);

4 – температура воды, воспринимающей тепло.

При соотношении объемов воды, отдающего и воспринимающего тепло:

2 – 1:3, 3 – 1:1

Таким образом, теплоаккумулятор с использованием раствора сульфата алюминия обеспечивает значительно большее количество накопленного аккумулятором тепла, практически в 7-8 раз, в сравнении с простой водой [76].

**Таблица 5.12 - Результаты эксперимента аккумулирования тепла с водой при начальной температуре 80°C**

Длительность, мин	Температура воды объемом 2,5 л, °C	Температура воды объемом 0,75 л, °C
В начале	15	80
1	16	70
2	18	67
3	19	62
4	20	55
5	22	50
6	22	48
7	23	40
8	24	36
9	25	33
10	26	30

Сделаем сравнительную характеристику аккумулирования тепла на основе растворов сульфата алюминия и сульфата натрия (Рис. 5.10). Для этого будем использовать площади, которые получили при построении графиков.

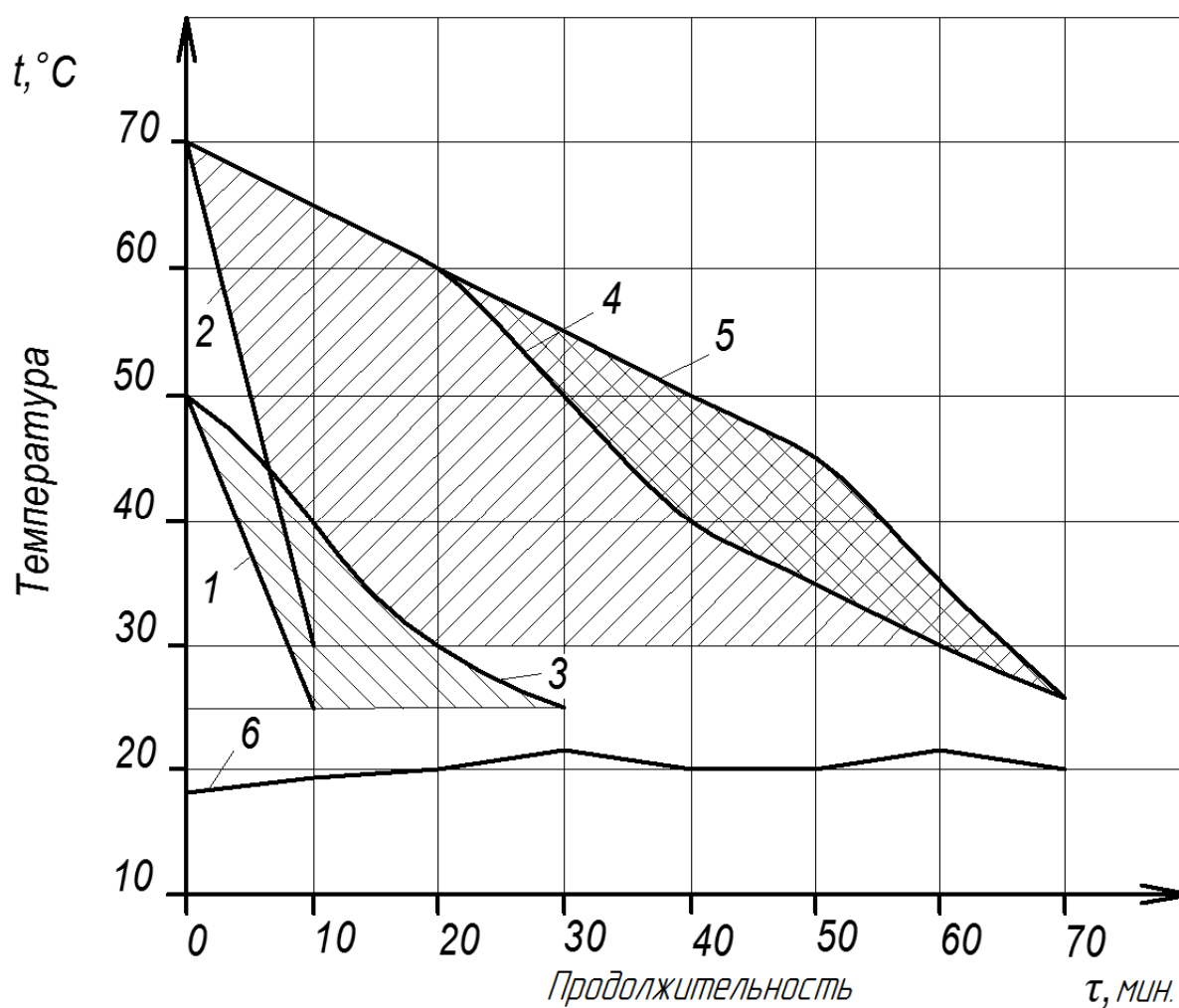


Рис. 5.10. Сравнительная характеристика аккумулярования тепла на основе растворов сульфата алюминия и сульфата натрия

1,2 – охлаждение воды;

3 – охлаждение  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (340 г/кг);

Соотношение объемов, отдающего и воспринимающего тепло – 1:3,3;

4,5 – охлаждение  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  (400г/кг);

При соотношении объемов воды, отдающего и воспринимающего тепло:

4 – 1:3,3;

5 – 1:1

6 – температура воды, воспринимающего тепло.

Из приведенных данных получаем:

1. Мощность аккумулирования тепла с водой при начальной температуре 60°C:

$$0,75 \cdot \frac{1}{2} \cdot 25 \cdot \frac{10}{60} \cdot 4,19 = 6,55 \text{ кДж};$$

2. Мощность аккумулирования тепла с водой при начальной температуре 80°C:

$$0,75 \cdot \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot \frac{10}{60} \cdot 4,19 = 10,48 \text{ кДж};$$

3. Мощность аккумулирования тепла с использованием насыщенного раствора сульфата натрия:

$$0,75 \cdot \frac{1}{2} \cdot 25 \cdot \frac{30}{60} \cdot 4,19 = 19,64 \text{ кДж};$$

4. Мощность аккумулирования тепла с использованием насыщенного раствора сульфата алюминия при соотношении объемов раствора, что отдает тепло и воды, что его воспринимает 1:3,3:

$$0,75 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{60} \cdot 4,19 \cdot (10 \cdot 20 + (20 + 40) \cdot 20 + (40 + 70) \cdot 15) = 79,87 \text{ кДж};$$

5. Мощность аккумулирования тепла с использованием насыщенного раствора сульфата алюминия при соотношении объемов раствора, что отдает тепло и воспринимающей его воды 1:1:

$$0,4 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{60} \cdot 4,19 \cdot (10 \cdot 20 + (20 + 55) \cdot 20 + (55 + 70) \cdot 15) = 49,93 \text{ кДж}.$$

Определим коэффициент эффективности аккумулирования тепла  $k_a$ , как соотношение удельных теплоаккумулирующих мощностей раствора и воды:

$$\text{Для раствора на основе сульфата натрия} - k_a = \frac{19,64}{6,55} = 3;$$

Для раствора на основе сульфата алюминия (при соотношении объемов раствора, который отдает тепло и воды, которая его воспринимает 1:3,3) –

$$k_a = \frac{79,87}{10,48} = 7,62;$$

Для раствора на основе сульфата алюминия (при соотношении объемов

раствора, который отдает тепло и воды, которая его воспринимает 1:1) –

$$k_a = \frac{49,93}{10,48} = 4,76.$$

Следовательно, например, если расход тепла для дома составляет 2 Гкал/сутки, то можно подсчитать объем, который нужен для емкости с раствором сульфата алюминия. По результатам экспериментов получено 19,10 ккал (79,87 кДж) при объеме  $0,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Таким образом, для 2 Гкал ( $2 \cdot 10^6$  ккал) получим  $78,5 \text{ м}^3$  при длительности потребления аккумулированного тепла 24 часа за сутки, а при длительности аккумулирования на 8 часов этот объем будет составлять  $26,2 \text{ м}^3$ .

Данные проведенные автором исследований по выбору типа кристаллогидратов, определение необходимых объемов аккумулирующих баков и общей схемы отопления здания использованы при реконструкции системы отопления корпуса №2 «ДонОРГРЭС», а также при выборе проектных систем отопления г. Зугрес и пгт Новый Свет (прил. Ж, прил. И).

Выводы по разделу:

1. Высокие цены на природный газ вызывают необходимость поиска альтернативных источников теплоснабжения.
2. Биологические виды топлива, например, рапсовое масло являются конкурентноспособными источниками генерации тепла не требующими существенной реконструкции основного котельного оборудования.
3. Использование электрической энергии для теплоснабжения обеспечивает разуплотнение графика электрической нагрузки в самый напряженный режим генерации – зимнее время.
4. Использование электрической энергии для генерации тепла в ночное время обеспечивает существенную экономию ресурсов.
5. При использования электрической энергии для генерации тепла целесообразно применять аккумулирование тепла в растворах кристаллогидратов с фазовым переходом.
6. Применение пересыщенных растворов сульфата натрия с иницированием

кристаллизации кристаллогидрата позволяет уменьшить объем баков-аккумуляторов в 7-8 раз по сравнению с аккумулярованием тепла водой.



## ВЫВОДЫ

1. Для повышения коэффициента использования топлива при генерации тепла обосновано использование конденсационных водогрейных котлов. В промышленных условиях показано, что применение водогрейных котлов, оборудованных насадкой из колец Рашига обеспечивает повышение  $K_{ит}$  генерации тепла до 98–108 % по  $Q_n^p$ .

2. Выведены критериальные уравнения, которые характеризуют процесс теплообмена в насадочных водогрейных котлах.

3. Применение конденсационных котлов оборудованных тепло и массообменной насадкой позволяет отказаться от водоподготовки и установки дымососов.

4. Определено влияние щелочности сетевой воды, pH и температуры ее подогрева на равновесное содержание угольной кислоты и обоснованы методы предотвращения накопления угольной кислоты в сетевой воде.

5. Впервые выведены аналитические зависимости влияния температуры, избытка воздуха и времени нахождения продуктов сгорания природного газа в зоне высоких температур на степень генерации  $NO_x$ .

6. Снижение генерации  $NO_x$  в водогрейных котлах за счет ограничения времени пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур до 0,3-0,5 с достигается за счет уменьшения объема камеры сгорания.

7. Обоснована целесообразность использования электрической энергии для теплоснабжения с использованием 3-х уровневых счетчиков и аккумулярование энергии в периоды «провала» графика электрических нагрузок.

8. Обосновано использование аккумулярования тепла. Определены параметры применения 3-х типов тепловых аккумуляторов с веществами без фазового и с фазовым переходом. На разработанный аккумулятор получен патент Украины.

9. Применение тепловых аккумуляторов с фазовым переходом позволяет повысить удельную мощность аккумуляторов для сульфатов алюминия и натрия,

соответственно, более чем в 10 раз и 3 раза в сравнении с аккумулярованием с подогревом воды.

10. На основании анализа теплоснабжения в 2-х климатических зонах для зданий разного объема и этажности определены расходы энергии на теплоснабжение.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Долінський А. А. Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми шляхи модернізації : [текст] / А.А. Долінський, Б.І. Басок та інш. – Київ: НАН України, 2007. – 837 с.
2. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. №145-р.
3. Жуковський С.С. Рекомендації щодо покращання повітрообміну в приміщеннях житлових будинків : [текст] / С.С. Жуковський, О.В. Кінаш // Львів: Національний університет «Львівська політехніка». – 2006. – 52 с.
4. Семенюк Л.Г. Экологически чистые теплоутилизационные установки контактно-поверхностного типа / Л.Г. Семенюк, А.А. Михайлов // Проблемы энергосбережения. – 1993. – №11, С. 79 – 85.
5. Семенюк Л.Г. Комплексная теплоутилизационная установка к контактного типа / Л.Г. Семенюк и др. // Электрические станции. – 1991. – №11. – С. 14-17.
6. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа : [текст] / И.З. Аронов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
7. Отопительный котел с использованием теплоты конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания мазута // Barthelmey H. Nur khapp 3000 DM mehr. Erstes wohnhaus mit olbrennwertkessel vorgestellt. // Sanit.-und Heizungstechn. – 1984. – 49. – №5. – P. 332-334.

8. Конденсационный отопительный котел, использующий в качестве топлива мазут // Fangmeyer M. Verio-Brennwertkessel fur ol, ein Beitragzum Um.Weltschwztz //Energ und Umwelt. Feuerungstechn. – 1988. – 26. - №2. – С. 54-58.

9. Висоцький С.П. Выбор путей повышения эффективности использования энергоносителей и их экономии / С.П. Висоцький, А.Н. Трубіцин, А.В. Кондрикінська // СОК (Сантехніка, опалення, кондиціювання). – 2011. – Вип. №2. - С. 44-47.

10. Патент України на корисну модель № 23268. Пристрій для нагріву води. Заявник та власник С.П. Висоцький, А.М. Трубіцин; опубл. 10.05.07, бюл. №17.

11. Патент України на винахід № 86084. Спосіб нагріву води та пристрій для його здійснення. Заявник та власник С.П. Висоцький, А.М. Трубіцин; опубл. 10.09.08, бюл. №17, 25.03.09, бюл. №6.

12. Лукьянов А.В. Теоретические основы и способы повышения энергоэкономических характеристик теплогенераторов локальных систем теплоснабжения. – Макеевка. – 2007.

13. Олексюк А.А. Энергоресурсосберегающие системы теплоснабжения с индивидуальными тепловыми пунктами и многоконтурными теплообменниками. – Макеевка. – 2008.

14. Андрійчук М.Д. Підвищення ефективності теплогенеруючих установок в умовах екологічного моніторингу. – Макіївка. – 2004.

15. Редько А.А. Научное обоснование методов усовершенствования систем геотермального теплоснабжения. – 2010.
16. Гелетуха Г.Г. Современное состояние и перспективы развития биоэнергетики в Украине / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Железная, Н.М. Жовмир, Ю.Б. Матвеев // Промышленная теплотехника. – 2005. - №1. – Том 27. – С. 78 – 85.
17. Александров В.Д. Аккумулирование тепла на основе фазовых переходов в материалах для использования в устройствах формирования комфортного микроклимата на железнодорожном транспорте для работы локомотивных бригад / В.Д. Александров, А.В. Лукьянов, В.А. Постников // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2011. - №27. – С. 127-132.
18. Бекман Г. Тепловое аккумулирование энергии : [текст] / Г. Бекман, П. Гилли. – М.: Мир. – 1987. – С. 272.
19. Вилох Ю. Аккумулирование тепла путем использования скрытой теплоты веществ / Ю.Вилох, В. Тоббер // Stadt und Gebeude technic. – 1981. – С. 326 – 340.
20. Хайнрих Г. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения / Г. Хайнрих, Х. Найорк, В. Нестлер // Пер. с нем. – М.: Стройиздат. – 1985. – С. 351.
21. Скрыпников В.Б. Анализ термодинамических процессов в системах охлаждения и тепловых насосах / Под ред. Скрыпникова В.Б. // РИО ПГАСА. – 2006. – С. 244.
22. Recover heat from flue gas / Shook James R. (Регенерация тепла из топочного газа) // Chem. Eng. Progr. – 1991. – №6. – С.49.

23. Басин Л.Г. Конденсационная отопительная техника в странах Западной Европы // Промышленная энергетика. – 1990. – №7. – С. 24-27.
24. Kraus Edwin. Brennwert –Technik System Vetter (Отопительный котел полной теплоты сгорания) // Sonnenerg und Wärmepumpe. – 1991. – №4. – С. 23-24.
25. Отопительный котел с блоком конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания жидкого топлива // Marci Lothar. Olkessel fur den Kondensationsbetrieb // Schweiz. Machinmarkt. – 1985. – №1. – Р. 28-29.
26. Украина: Эффективность малой энергетики. – Киев: ЕС Energy in Kiev (Программа Tacis). – 1997. – С. 280.
27. Маляренко В.А. Тепловые режимы зданий – основа эффективного управления системой теплоснабжения / В.А. Маляренко, В.Н. Голощапов // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2006. – №11. – С. 10-14.
28. Маляренко В.А. Энергосберегающий потенциал в жилом фонде города Харькова / В.А. Маляренко, Н.А., Орлова // Энергетика, теплотехнологии и энергосбережение. – 2003. – №4. – С.36-40.
29. Державний комітет будівництва , архітектури та житлової політики України. Цільова програма стабілізації роботи та розвитку комунальної теплоенергетики України. ВАТ «Проектний та науково-дослідний інститут по газопостачанню, теплопостачанню та комплексному благоустрою міст і селищ України». УкрНДІнжерпроект. – Київ. – 2005.
30. Манюк В.И. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей. Справочник / В.И. Манюк, Я.И. Каплинский, Э.Б. Хиж и др. // М.: Стройиздат. – 1988. – 432 с.

31. Информационный материал компании VTS Clima.
32. Кудинов А.А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках // Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет. – 2000. – 139с.
33. Семенюк Л.Г. Получение конденсата при глубоком охлаждении продуктов сгорания // Промышленная энергетика. – 1987. - №8. – С. 47-50.
34. Левеншпиль О. Инженерное оформление химических процессов // М.: Химия. – 1969. – 624 с.
35. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии // М.: Химия. – 1971. – 496 с.
36. Хантли Г. Анализ размерностей. / Пер. с англ. // М.: Мир. – 1970. – 176с.
37. Бенедек П. Научные основы химической технологии. / Пер с нем. // Л.: Химия. – 1970. – 377 с.
38. Висоцький С.П. Повышение эффективности использования природного газа и уменьшение насыщения теплоносителя углекислым газом в теплофикационных установках / С.П. Висоцький, О.В. Лук'янов, А.В. Кондрикінська // Вісті АДІ ДонНТУ. – 2011. – Вип. № 1 (12). – С. 201-208.
39. Висоцький С.П. Накипоутворення в теплофікаційних системах / С.П. Висоцький, Г.В. Фаткуліна // Вісник ДонНАБА. – 2009. – №2(76). – С. 99-105.
40. Ralph Sims. Reaching consensus on sustainable biofuels // Renewable energy world. – Vol.11. – 2008. – №5. – P.147-155.

41. Jackie Jones. Bioenergy snapshot Heat and energy from biomass // Renewable energy world. – Vol.9. – 2006. – №4. – P.184-193.
42. Jonathan Johng. Where to watch // Renewable energy world. – Vol.10. – 2007. – №5. – P.123-125.
43. Панцхава Е.С. Техническая биоэнергетика. Био- и термохимическая конверсия биомассы в газообразное, жидкое и твердое топливо / Е.С. Панцхава, И.В. Березин // Биотехнология. – 1986. – №3. – С.8-15;
44. Высоцкий С.П. Энергоносители для автомобильного транспорта / С.П. Высоцкий, Н.А. Столярова, Н.В. Ботвина // Донецк: Энергосбережение. – 2010. – №12. – С. 14-16;
45. Eize de Vries. Future of biodiesel? A look at the potential benefits of jatropha // Renewable energy world. – Vol.10. – 2007. - №3. – P.136-142.
46. Petri Konttinen. Biogas. // Renewable energy world. – Vol.11. – 2008. – №5. – P.147-155.
47. Distributed Generation. A future for bio-oils. // Power Engineering. – January, 2004. – P.31-33.
48. Sian Green. Better off in a warmer world? // Power Engineering. – December, 2003. – P.16-18.
49. Edward Milford. American dream? Tacling climat change in the us. // Renewable energy world. – Vol.10. – 2007. – №4. – P.130-141.
50. Candida Jones. What now for carbon? // Renewable energy world. – Vol.9. – 2006. – №4. – P.194-201.



51. Jett Decner. CO<sub>2</sub> reductions: Not such a difficult forget to hit. // Renewable energy world. – Vol.11. – 2008. – №6. – P.75-78.
52. Висоцький С.П. Економічні та екологічні показники використання теплових насосів та різних видів палива / С.П. Висоцький, А.В. Кондрикінська, Н.Н. Вахтангішвілі // Вісник ДонНАБА «Інженерні системи та техногенна безпека». – 2012. – Вип. № 2 (94). – С. 9-14.
53. Junior Isles. The carbon question. // Power Engineering. – Oktober, 2002. – P.33-35.
54. Sanna Alitalo, Tauno Kuitunen. Fueling the technology. // Power Engineering. – Auqust, 2001. – P.33-37.
55. Высоцкий С.П. Применение биомассы как альтернативного источника энергоснабжения / С.П. Высоцкий, А.А. Чернюк // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник / АДІ ДонНТУ. – Горлівка. – 2007. – №2 (5). – С.191-197.
56. H.van Veen. Water gas shift membrane reactor for CO<sub>2</sub> emission reduction and hydrogen production / H.van Veen, Y.C. van Delft, E.M. van Dorst, P.P.A.C. Pex. // Presented at the 6<sup>th</sup> Netherlands Process Technology Symposium. – Veldhoven, the Netherlands, 24-25 October 2006. February 2007.
57. Jokenhövel T. Salt of the earth: carbon capture via aminoacid flue gas scrubbing. / Tobias Jokenhövel , Rudiger Schneider, Helmut Rode // Power Engineering. – 2010. – Vol. 18, Issue 5, May.

58. Олейник Є. Енергетичні плантації. Чи можна зменшити залежність України від імпортованих енергоносіїв? / Є. Олейник, М. Жовмір, К. Дрозд, Т. Єловікова // Біоенергоресурси. – 2007. – №3. – С. 6-9.
59. Гелету́ха Г.Г. Киотский протокол и дополнительные инвестиции в энергосбережение / Г.Г. Гелету́ха, Ю.Б.Матвеев, А.В. Филоненко // Промышленная теплотехника. – 2006. – Том 28. – №2. – С. 125-131.
60. Хвесик М.А. Розміщення продуктових сил та регіональна економіка: Навчальний посібник: – К.: Кондор, 2004. – 344 с.
61. Small scale biomass. // Power Engineering. – April, 2003. – P. 89-91.
62. Высоцкий С.П. Экологические факторы использования возобновимых энергоресурсов. / С.П. Высоцкий, Е.С. Щербушенко // Збірник наукових праць ЯНАУ. Технічні науки. – 2007. – №70. – С.41-54.
63. Гуртовцев А.Л. Об опыте Украины по выравниванию графика электрической загрузки энергосистем. // Электрические станции. – 2007. – №10. – С. 51-55.
64. Розумський О.Т. Оцінка витрат палива при нерівномірності графіка електроспоживання. / О.Т. Розумський, А.В. Рухнов // Науковий вісник НТУ. Технології енергозбереження. – 2011. – №1. – С. 75-78.
65. Щинников П.А. Анализ влияния параметров регулирования теплофикационных энергоблоков на перерасход топлива / П.А. Щинников, А.И. Дворцовой // Теплоэнергетика. – 2011. – №10. – С. 41-44.

66. Richard Baxter. A call for back-up. How energy storage could make a valuable contribution to renewable. // Renewable energy world. – Vol.10. – 2007. – №5. – P. 88-100.
67. Rattan Tawney, John Ehman, Mona Brown. Configuration to maximize returns. // Power Engineering. – June, 2010. – P.73-77.
68. Любчик Г.М. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії. / Г.М. Любчик, Г.Б. Варламов, В.А. Маляренко // К.: ІВЦ «Політехніка». – 2003. – 232 с.
69. Мхитарян Н.М. Энергосберегающие технологии в жилищном и гражданском строительстве. – Киев: Наук. Думка, 2000. – 228 с.
70. Басок Б.И. Анализ когенерационных установок. Классификация и основные показатели / Б.И. Басок, Е.Т. Базеев, В.М. Диденко, Д.А. Коломейко // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т.28. – №3. – С. 83-89.
71. Клименко В.Н. Проблемы когенерационных технологий в Украине // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т.23. – №4-5. – С. 106-110.
72. Закон Украины «О комбинированном производстве тепловой и электрической энергии (когенерации) и использовании сбросного энергопотенциала» // Ведомости Верховной Рады. – 2005. – №20. – С. 278-285.
73. Шпильрайн Э.Э. К вопросу о термодинамике получения низкопотенциального тепла // Теплоэнергетика. – 1998. – №9. – С. 20-23.
74. Клименко В.Н. Энергетические характеристики когенерационной установки на частичных тепловых нагрузках / В.Н. Клименко, П.П. Сабашук,

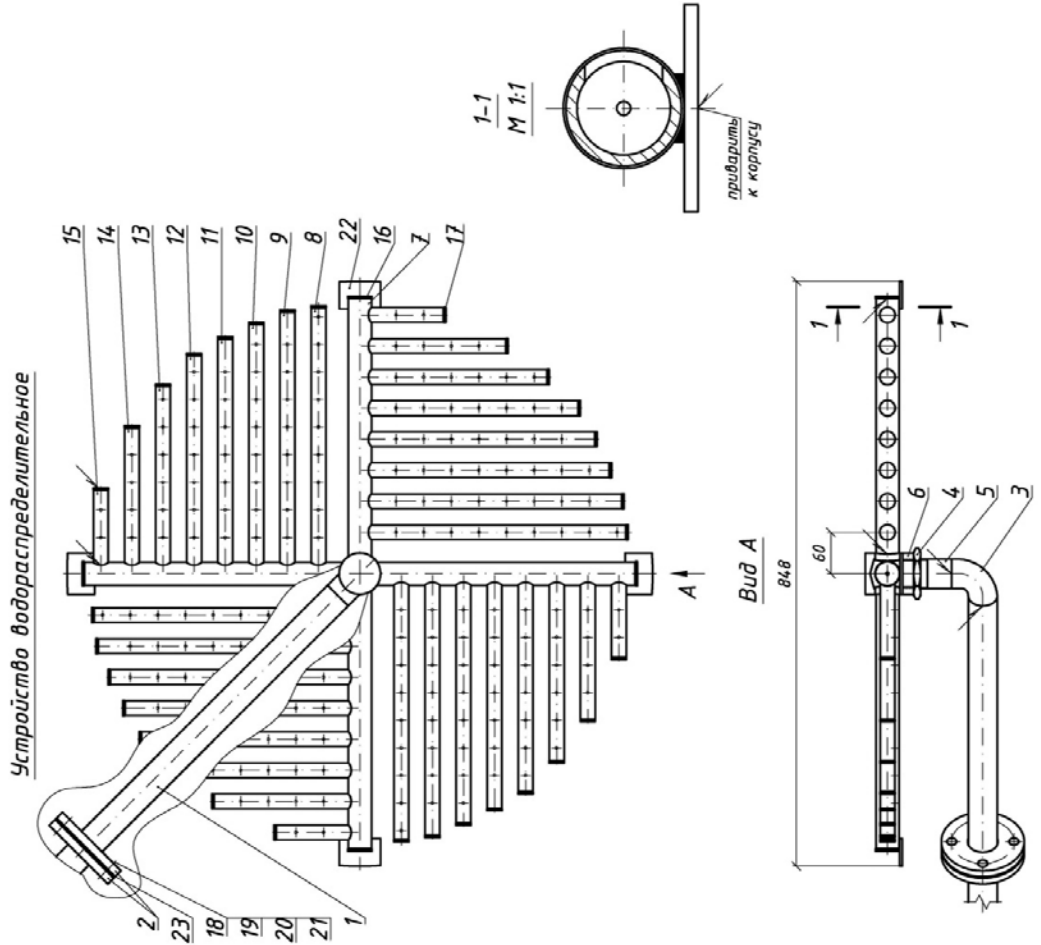
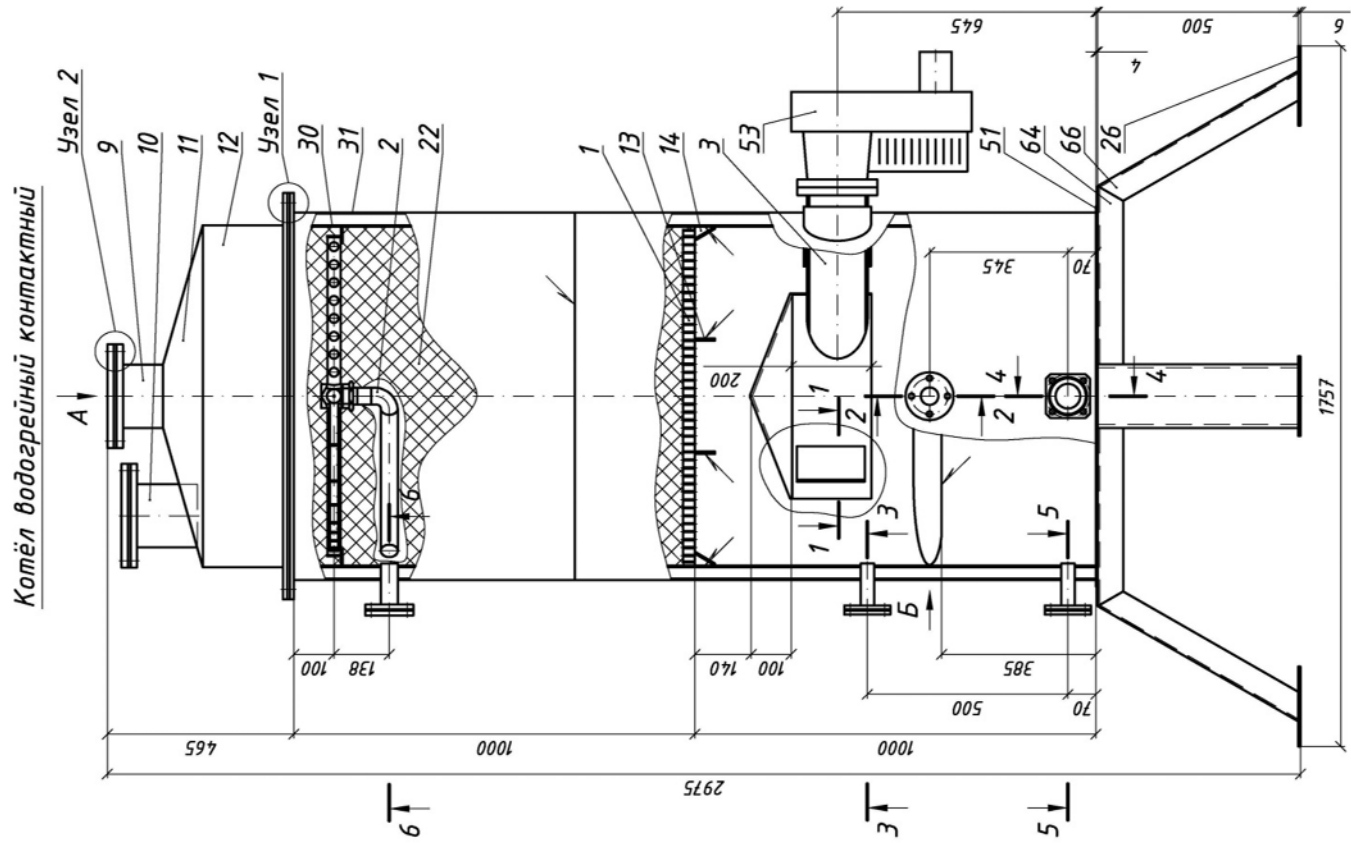
Ю.Г. Клименко и др. // Промышленная теплотехника. – 1997. – Т. 19. – №3. – С. 51-56.

75. Левенберг В.Д. Аккумуляирование тепла / В.Д. Левенберг, М.Р. Ткач, В.А. Гольстрем // К. Техника. – 112 с.

76. Патент України на корисну модель № 74690 МПК F24H 7/00, F24H 9/00. Пристрій для акумулювання тепла для теплопостачання. Висоцький С.П., Кондрикінська А.В. Заявник та власник С.П. Висоцький, А.В. Кондрикінська - № u 2012 04232; заявл. 05.04.12; опубл. 12.11.12, Бюл. №21.

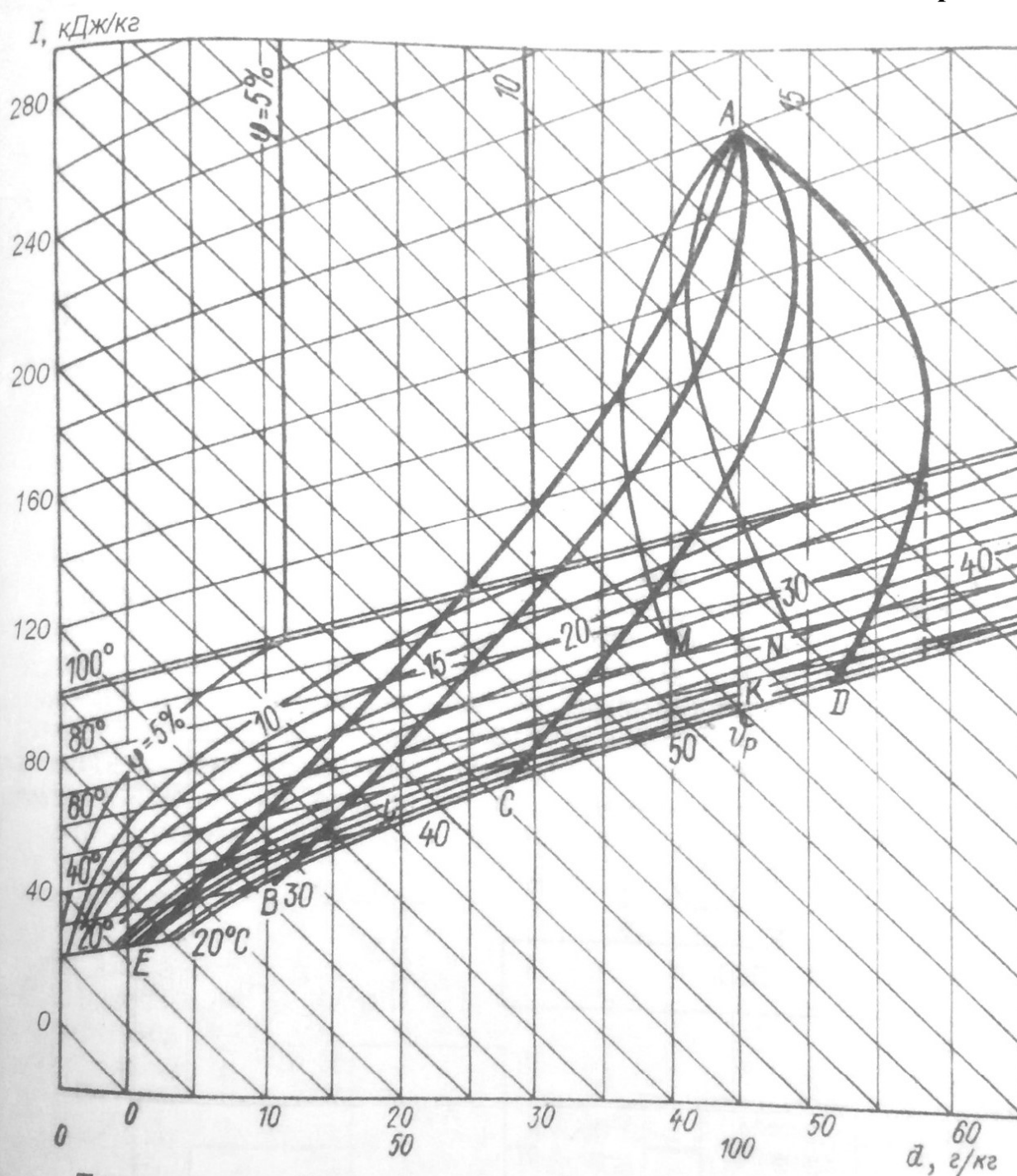
77. Дрьомін В.П. Аналіз витрат палива блоками ТЕС і можливості їх економії при регулюванні електроспоживання / В.П. Дрьомін, Г.П. Костенко, О.В. Згуровець // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – №17. – С. 73-77.

Приложение А



Примечание:  
1. Сборка - ручная втулка ГОСТ 5264-70, для труб - в среде инертного газа.

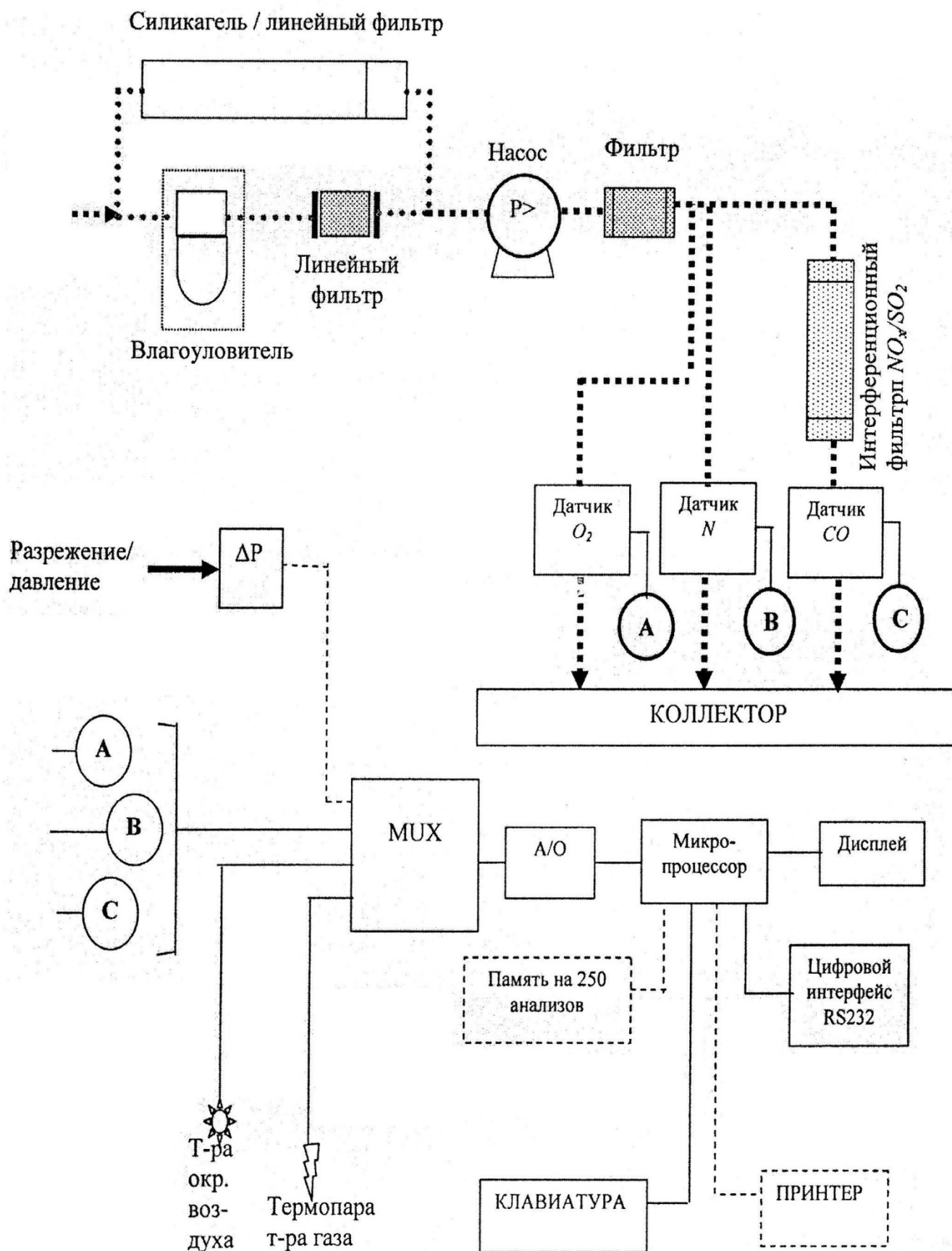
## Приложение Б



Процесс охлаждения газов в конденсационных теплообменниках  
поверхностного и контактного типов  $I-d$  - диаграмме

Кривая	$\vartheta_1, ^\circ\text{C}$	$\vartheta_2, ^\circ\text{C}$
Контактный теплообменник		
Противоток		
AE	15	45
AB	30	$=\vartheta_p$
AC	45	$>\vartheta_p$
AD	55	$=\vartheta_m$
Прямоток		
AM	20	$=\vartheta_p$
AN	40	$>\vartheta_p$
Поверхностный теплообменник		
AKL	15	45

## ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ГАЗОАНАЛИЗАТОРА «ECOLINE PLUS»



## Приложение Г

**Сопоставление вариантов реконструкции котельной в г. Тетиеве при  
использовании котлов разных производителей**

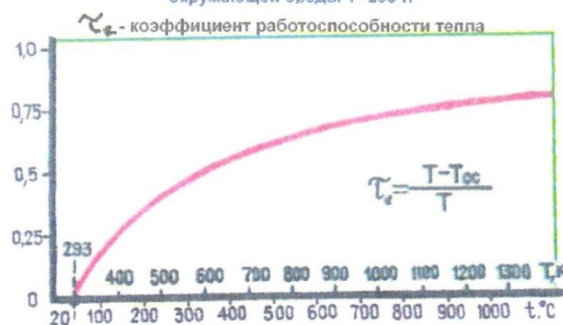
№ п/п			Ед. изм.	Варианты реконструкции			
				I	II	III	IV
				Котлы конденса ционные СВТ (Украина)	Котлы 3-х ходовые (Германия)	Котлы «Колви» (Украина)	Котлы существу ющие
1	КПД	по $Q_p^B$	%	94	76	74	62
		по $Q_p^H$	%	110	92	90	78
2	Годовое потребление природного газа		тыс. м <sup>3</sup> /год	636,0	760,4	777,3	896,93
3	Экономия газа в год по отношению к варианту IV		тыс. м <sup>3</sup> /год	260,9	136,5	119,6	0
4	Потребление газа в год		тыс. м <sup>3</sup> /год	1672,7	2000,0	2044,4	2358,9
5	Экономия газа в год по отношению к варианту IV		тыс. грн	686,2	359,0	314,5	0
6	Потребление электроэнергии в год		тыс. кВт.ч	129,4	125,9	125,9	172,5
7	Затраты на электроэнергию в год		тыс. грн	99,6	97,0	97,0	132,8
8	<b>Экономия электроэнергии в год</b>		тыс. грн	33,2	35,9	35,9	0
9	Годовая реализация тепла		тыс. грн	2915,6	2915,6	2915,6	2915,6
10	Стоимость реконструкции		тыс. грн	3700,0	4600,0	3900,0	0
11	<b>Экономическая эффективность</b>		тыс. грн	1143,3	818,7	774,2	423,8
12	Окупаемость (см. примечание)		лет	5,1	11,7	11,1	0
13	Срок окупаемости проекта		лет	3,2	5,6	5,0	

- Примечание:** 1. Для корректного сравнения варианты реконструкции приведены к одинаковым условиям по комплектации оборудованием и материалами и выполнены по одному расширенному Техническому Заданию на проектирование
2. п.11 «Экономическая эффективность» ----- средства, остающиеся у предприятия после оплаты за газ и эл. энергию, до выплаты зарплат и налогов.
3. п.12 «Окупаемость» ----- посчитана только за счет получаемой экономии средств по газу и эл. энергии, не затрагивая «базовых» средств предприятия, т.е. средств, остающихся в распоряжении предприятия на сегодняшний день (п.11, IV вариант, в сумме 423,8 тыс. грн.)
4. Подключенные нагрузки :                    по отоплению ----- 3,4 МВт  
   по ГВС ----- 0,91 МВт
5. Установленная мощность (после реконструкции) ----- 6,2 МВт

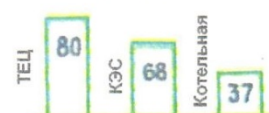


## Сравнение КПД генерации тепла и электроэнергии

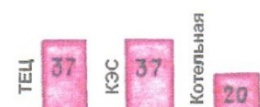
Зависимость коэффициента работоспособности  
тепла от температуры (Т) при температуре  
окружающей среды T=293 К



Сравнение эффективности  
работы:

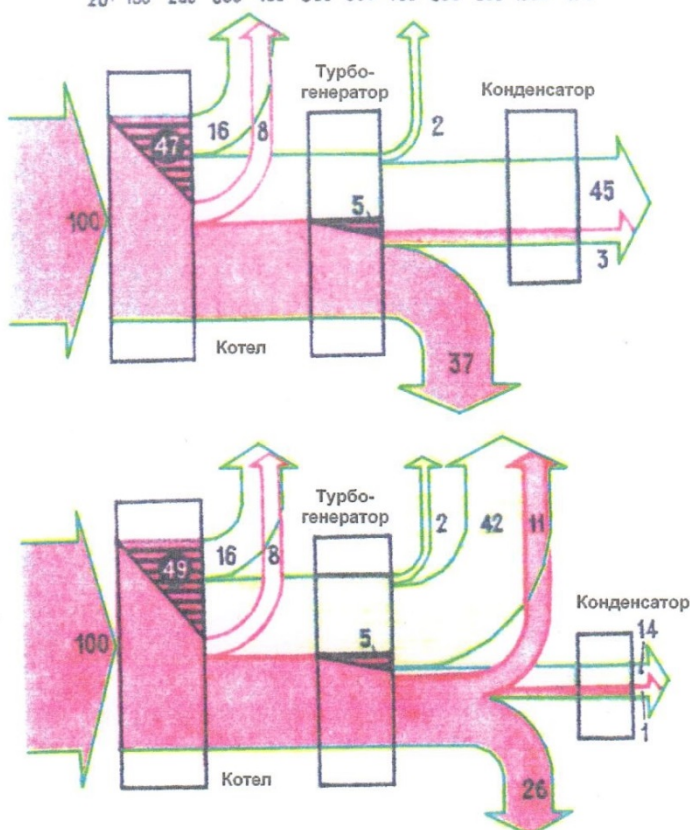
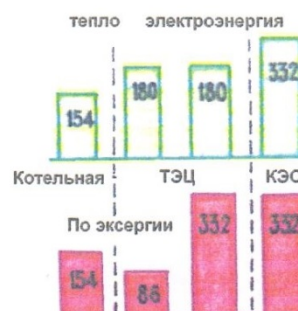


По тепловому КПД

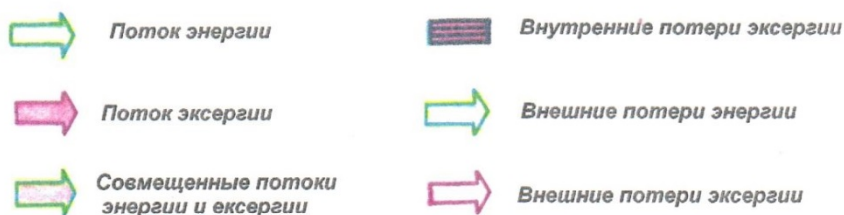


По эксергетическому КПД

Удельный расход топлива  
(г/кВт\*ч) на выработку  
электроэнергии и тепла:  
по тепловому эквиваленту



Условные обозначения:



Примечание: все данные указанные на диаграммах в потоках - в процентах



**НАЦІОНАЛЬНА КОМІСІЯ, ЩО ЗДІЙСНЮЄ ДЕРЖАВНЕ  
РЕГУЛЮВАННЯ У СФЕРІ ЕНЕРГЕТИКИ**

**ПОСТАНОВА**

**23.04.2012 № 497**

**Зареєстровано в Міністерстві  
юстиції України  
23 квітня 2012 р.  
за № 598/20911**

**Про встановлення тарифів на електроенергію, що  
відпускається населенню**

Відповідно до Закону України „Про електроенергетику”, Указу Президента України від 23.11.2011 № 1059 „Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики” Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики,  
**ПОСТАНОВЛЯЄ:**

1. Встановити тарифи на електроенергію, що відпускається населенню (додаються).
2. Управлінню цінової політики в електроенергетиці в установленому порядку забезпечити подання цієї постанови на державну реєстрацію до Міністерства юстиції України.
3. Ця постанова набирає чинності з 01 травня 2012 року, але не раніше дня її офіційного опублікування.

**Голова Комісії**

**С. Тітенко**

---

**ЗАТВЕРДЖЕНО**  
**Постанова Національної комісії,**  
**що здійснює державне**  
**регулювання у сфері енергетики**  
**23.04.2012 № 497**

**Зареєстровано в Міністерстві**  
**юстиції України**  
**23 квітня 2012 р.**  
**за № 598/20911**

## **ТАРИФИ**

### **на електроенергію, що відпускається населенню**

Категорії споживачів	Тарифи на електроенергію, в копійках за 1 кВт·год		
	Без ПДВ	ПДВ	З ПДВ
1. Електроенергія, що відпускається:			
1.1. Населенню:			
за обсяг, спожитий до 150 кВт·год електроенергії на місяць (включно)	23,35	4,67	28,02
за обсяг, спожитий понад 150 кВт·год до 800 кВт·год електроенергії на місяць (включно)	30,4	6,08	36,48
за обсяг, спожитий понад 800 кВт·год електроенергії на місяць	79,8	15,96	95,76
для багатодітних, прийомних сімей та дитячих будинків сімейного типу незалежно від обсягів споживання електроенергії	23,35	4,67	28,02
1.2. Населенню, яке проживає в сільській місцевості:			
за обсяг, спожитий до 150 кВт·год електроенергії на місяць (включно)	21,6	4,32	25,92
за обсяг, спожитий понад 150 кВт·год до 800 кВт·год електроенергії на місяць (включно)	28,1	5,62	33,72

за обсяг, спожитий понад 800 кВт•год електроенергії на місяць	79,8	15,96	95,76
для багатодітних, прийомних сімей та дитячих будинків сімейного типу незалежно від обсягів споживання електроенергії	21,6	4,32	25,92
1.3. Населенню, яке проживає в житлових будинках (у тому числі в житлових будинках готельного типу та гуртожитках), обладнаних у встановленому порядку кухонними електроплитами (у тому числі в сільській місцевості):			
за обсяг, спожитий до 250 кВт•год електроенергії на місяць (включно)	17,95	3,59	21,54
за обсяг, спожитий понад 250 кВт•год до 800 кВт•год електроенергії на місяць (включно)	23,35	4,67	28,02
за обсяг, спожитий понад 800 кВт•год електроенергії на місяць	79,8	15,96	95,76
для багатодітних, прийомних сімей та дитячих будинків сімейного типу незалежно від обсягів споживання електроенергії	17,95	3,59	21,54
1.4. Населенню, яке проживає в житлових будинках (у тому числі в житлових будинках готельного типу та гуртожитках), обладнаних у встановленому порядку електроопалювальними установками або електроопалювальними установками та кухонними електроплитами (у тому числі в сільській місцевості):			
1.4.1. В період з 1 травня по 30 вересня (включно):			
за обсяг, спожитий до 250 кВт•год електроенергії на місяць (включно)	17,95	3,59	21,54
за обсяг, спожитий понад 250 кВт•год до 800 кВт•год електроенергії на місяць (включно)	23,35	4,67	28,02
за обсяг, спожитий понад 800 кВт•год електроенергії на місяць	79,8	15,96	95,76
1.4.2. В період з 1 жовтня по 30 квітня (включно):			

за обсяг, спожитий до 3600 кВт•год електроенергії на місяць (включно)	17,95	3,59	21,54
за обсяг, спожитий понад 3600 кВт•год електроенергії на місяць	79,8	15,96	95,76
1.4.3. Для багатодітних, прийомних сімей та дитячих будинків сімейного типу незалежно від обсягів споживання електроенергії	17,95	3,59	21,54
1.5. Населенню, яке проживає в багатоквартирних будинках, не газифікованих природним газом і в яких відсутні або не функціонують системи централізованого теплопостачання:			
1.5.1. В період з 1 травня по 30 вересня (включно):			
за обсяг, спожитий до 250 кВт•год електроенергії на місяць (включно)	17,95	3,59	21,54
за обсяг, спожитий понад 250 кВт•год до 800 кВт•год електроенергії на місяць (включно)	23,35	4,67	28,02
за обсяг, спожитий понад 800 кВт•год електроенергії на місяць	79,8	15,96	95,76
1.5.2. В період з 1 жовтня по 30 квітня (включно):			
за обсяг, спожитий до 3600 кВт•год електроенергії на місяць (включно)	17,95	3,59	21,54
за обсяг, спожитий понад 3600 кВт•год електроенергії на місяць	79,8	15,96	95,76
1.5.3. Для багатодітних, прийомних сімей та дитячих будинків сімейного типу незалежно від обсягів споживання електроенергії	17,95	3,59	21,54
1.6. Населенню, яке розраховується з енергопостачальною організацією за загальним розрахунковим засобом обліку та об'єднане шляхом створення юридичної особи, крім гуртожитків	30,4	6,08	36,48
1.7. Гуртожиткам (які підпадають під визначення „населення, яке розраховується з енергопостачальною організацією за загальним розрахунковим засобом обліку та об'єднане	23,35	4,67	28,02

шляхом створення юридичної особи”)			
1.8. Гуртожиткам (які підпадають під визначення „населення, яке розраховується з енергопостачальною організацією за загальним розрахунковим засобом обліку та об’єднане шляхом створення юридичної особи”) у сільській місцевості	21,6	4,32	25,92
1.9. Населенню, яке розраховується з енергопостачальною організацією за загальним розрахунковим засобом обліку та об’єднане шляхом створення юридичної особи, і проживає в житлових будинках (у тому числі в житлових будинках готельного типу), обладнаних кухонними електроплитами та/або електроопалювальними установками (у тому числі в сільській місцевості), крім гуртожитків	23,35	4,67	28,02
1.10. Гуртожиткам (які підпадають під визначення „населення, яке розраховується з енергопостачальною організацією за загальним розрахунковим засобом обліку та об’єднане шляхом створення юридичної особи”), що розташовані в будинках, обладнаних кухонними електроплитами та/або електроопалювальними установками (у тому числі в сільській місцевості)	17,95	3,59	21,54
2. Електроенергія, що відпускається споживачам, прирівняним до населення	30,4	6,08	36,48

## Примітка.

Електрична енергія, яка витрачається в багатоквартирних будинках та гуртожитках на технічні цілі (роботу ліфтів, насосів та замково-переговорних пристроїв, що належать власникам квартир багатоквартирного будинку на праві спільної власності) та освітлення дворів, східців і номерних знаків, відпускається за тарифом 30,4 коп. за 1 кВт.год (без ПДВ).

Електрична енергія, яка витрачається в багатоквартирних будинках та гуртожитках, розташованих у сільській місцевості, на технічні цілі (роботу ліфтів, насосів та замково-переговорних пристроїв, що належать власникам квартир багатоквартирного будинку на праві спільної власності) та освітлення дворів, східців і номерних знаків, відпускається за тарифом 28,1 коп. за 1 кВт.год (без ПДВ).

Електрична енергія, яка витрачається в дачних та дачно-будівельних кооперативах, садових товариствах, гаражно-будівельних кооперативах на технічні цілі (роботу насосів) та освітлення території, відпускається за тарифом 30,4 коп. за 1 кВт.год (без ПДВ).

**Заступник начальника  
управління цінової політики  
в електроенергетиці**

**Р. Кайдаш**

## Приложение Ж

Утверждаю:

Директор ДПИ НИИ

«Теплоэлектропроект»

В.Ф. Ларионов

11.2012г.



Акт

Мы, нижеподписавшиеся, главный инженер проекта ДПИ НИИ «Теплоэлектропроект» Ильяш В.В., руководитель аспиранта профессор Высоцкий С.П. и аспирант Кондрыкинская А.В., составили настоящий акт о том, что при реконструкции систем теплоснабжения п.г.т. Новый Свет и г. Зугрэс использованы разработки аспиранта Кондрыкинской А.В. в части использования электрической энергии для теплоснабжения и аккумулирования тепла в пересыщенных растворах веществ с фазовым переходом.

В.В. Ильяш

С.П. Высоцкий

А.В. Кондрыкинская

## Приложение И

МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА  
ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ  
УКРАЇНИ

Державне Донбаське підприємство  
з пуску, налагодження, вдосконалення  
технології та експлуатації електростанцій  
та мереж  
**"ДОНОРГРЕС"**

пр. Леніна, 4а, м. Горлівка, Донецької обл., Україна,  
84601

Телефон: (06242) 42232, (0624) 597947  
Факс: (06242) 44446 (0624) 522548  
E-mail: [pm@donorgres.com.ua](mailto:pm@donorgres.com.ua)



МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И  
УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
УКРАИНЫ

Государственное Донбасское предприятие  
по пуску, наладке, совершенствованию  
технологии и эксплуатации электростанций  
и сетей  
**"ДОНОРГРЭС"**

пр. Ленина, 4а, г. Горловка, Донецкой обл., Украина,  
84601

Телефон: (06242) 42232, (0624) 597947  
Факс: (06242) 44446 (0624) 522548  
E-mail: [pm@donorgres.com.ua](mailto:pm@donorgres.com.ua)

16.11.2022 р. № 1080-01/50

на \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим подтверждаем, что при реконструкции системы отопления корпуса № 2 Государственного Донбасского предприятия по пуску, наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей "ДОНОРГРЭС" использованы разработки ассистента Донбасской Национальной академии строительства и архитектуры Кондрыкинской Анны Викторовны в части определения мощности установки энергоснабжения, выбора источника теплоснабжения и аккумулирования тепла с использованием тепла фазового перехода кристаллогидратов.

Предполагаемый годовой экономический эффект составляет 230 тыс. грн.

Директор



В.И.Ткачев







УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **74690** (13) **U**

(51) МПК (2012.01)

**F24H 7/00****F24H 9/00**

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки: **u 2012 04232**  
 (22) Дата подання заявки: **05.04.2012**  
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **12.11.2012**  
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **12.11.2012, Бюл.№ 21**

(72) Винахідник(и):  
**Висоцький Сергій Павлович (UA),**  
**Кондрикінська Анна Вікторівна (UA)**  
 (73) Власник(и):  
**Висоцький Сергій Павлович,**  
 пр-т Перемоги, 29, кв. 39, м. Горлівка,  
 Донецька обл., 84617 (UA),  
**Кондрикінська Анна Вікторівна,**  
 м-н "Комсомольський", 28, кв. 6, м. Макіївка,  
 86130 Україна (UA)

**(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛА ДЛЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ****(57) Реферат:**

Пристрій для акумулювання тепла для теплопостачання включає секції, заповнені теплоакumuлюючою речовиною. Секції акумулювання тепла розміщені послідовно в потоці води, що відбирає тепло, а ініціювання процесу кристалізації починають із останньої по ходу води секції, за допомогою ультразвукових пристроїв, що підключені до відповідних секцій.

**UA 74690 U**



## UA 74690 U

Корисна модель належить до комунальної енергетики та може бути використана в пристроях для акумулювання тепла.

Відомий пристрій акумулювання теплової енергії, в якому використовується один або декілька матеріалів із густиною що перевищує густину води, наприклад свинець, що дозволяє підвищити питому теплоємність акумулюючої речовини [1].

Недоліком вказаного пристрою є обмежена теплоємність акумулюючих матеріалів, їх здатність забруднювати основний теплоносієм - воду, що надходить в систему теплофікації, а також ініціювання корозійних процесів в тепловому акумуляторі внаслідок виникнення різниці потенціалів між основним конструктивним матеріалом акумулятора та акумулюючою речовиною.

Іншим відомим технічним рішенням для акумулювання тепла є використання різниці в фізичному стані речовини, при якому при підводі теплоти речовина переходить із твердого стану в рідкий, а при кристалізації - зворотному переходу - речовина віддає тепло в зовнішній контур, наприклад для теплопостачання з використанням бака з секціями, які заповнені теплоакumuлюючою речовиною. Така теплота є скритою теплотою фазового перетворення. Для акумулювання тепла використовуються кристалогідрати, для розплаву яких необхідна значна кількість енергії. При нагріві кристалогідратів утворюється так званий гідратний розчин. Кристалогідрати використовують в сонячних обігрівачах в жилому секторі в США. Використання кристалогідратів дозволяє суттєво (в декілька разів) скоротити об'єм теплоакumuлюючих баків, а отже значно зменшити обсяги капітальних вкладень [2].

Проте використання енергоакumuлюючих пересичених розчинів солей (кристалогідратів) не дозволяє забезпечити надійний відвід тепла в разі необхідної потреби. Це зумовлено тим, що навіть при високому ступені пересичення індукційний період кристалізації солей може сягати десятки годин. Це не дозволяє надійно використати накопичене за рахунок фазового переходу тепло. Окрім цього процес кристалізації при відборі тепла здійснюється лавиноподібно, що також не дозволяє використати весь обсяг виділеного тепла та може призвести до перегріву, або кипіння розчину. Це також знижує ефективність процесу акумулювання тепла.

Задачею корисної моделі є забезпечення регулювання процесу відводу тепла від акумулюючої речовини та скорочення капітальних та експлуатаційних витрат на процес акумулювання тепла.

Поставлена задача вирішується тим, що секції акумулювання тепла розміщені послідовно в потоці води, що відбирає тепло, а ініціювання процесу кристалізації починають із останньої по ходу води секції, за допомогою ультразвукових пристроїв, що підключені до відповідних секцій.

Корисна модель пояснюється кресленням, де показаний накопичувач тепла з фазовим переходом акумулюючої речовини, 1 - потік теплоносія для подачі підігрітої води споживачам, 2 - розчин речовини з фазовим переходом, 3 - електричні нагрівачі (ТЕНи), 4 - ультразвукові випромінювачі (ініціатори кристалізації), А - вхід води, що нагрівається, В - вихід підігрітої води.

Корисна модель працює таким чином, що тепловий акумулятор виконаний у вигляді бака (фіг. 1), в якому послідовно розташовані ємності, заповнені розчином акумулюючої речовини (2), що має властивість при підігріві здійснювати фазовий перехід переходити в розчин, а при кристалізації віддавати тепло фазового переходу в теплову мережу. Для накопичення тепла в ємностях з акумулюючою тепло речовиною встановлені електричні нагрівачі (3), що в періоди міжпикового електричного навантаження нагрівають теплоакumuлюючу речовину та здійснюють її фазовий перехід з твердого в рідкий стан. При цьому контур речовини, що відбирає тепло фазового переходу (1), наприклад вода, послідовно контактує з ємностями, заповненими теплоакumuлюючою речовиною (2). Для ініціювання кристалізації в пересиченому розчині встановлені ультразвукові пристрої (4).

Прикладом використання пристрою для акумулювання теплової енергії, одержаної за рахунок використання теплоелектронагрівачів (ТЕНів), що підключаються в нічний час, коли вартість електроенергії по 3-и зонному тарифу складає 35 % від середньої вартості є його застосування для обігріву адміністративного будинку. Це дозволяє використовувати електричну енергію, яка одержується в Україні, в основному за рахунок опалювання твердого палива на теплових електростанціях та за рахунок розщеплення урану на атомних електростанціях. Енергоносії, які використовуються на вказаних електростанціях, мають значно меншу вартість порівняно з природним газом.

Адміністративна будівля має загальний об'єм опалення 12300 м<sup>3</sup>. В будинку існують підвальні приміщення, в яких можуть бути розташовані ємності з акумулюючою речовиною та насоси циркуляції теплоносія. Вимірювання обсягів теплопостачання при зовнішній температурі -14 °С та температурі всередині будівлі +20 °С показали, що необхідна кількість теплової

енергії, що споживається за добу складає 2,2 Гкал (9,21 ГДж=2558 кВтгод). Це відповідає потужності 320 кВт, що споживається в міжпіковий період часу з 23,00 до 7,00.

Для акумулювання теплової енергії, яка одержується в нічні години міжпикового споживання енергії, використовується нітрат літію  $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , що плавиться при температурі 30 °C та має теплоту плавлення 306 кДж/кг (73,2 ккал/кг=0,085 кВтгод/кг) або менш дефіцитний реагент глауберову сіль - сульфат натрію  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  з температурою плавлення 186 кДж/кг (44,5 ккал/кг=0,019 кВтгод/кг).

При використанні нітрату літію необхідний об'єм накопичувача теплоти для конкретної будівлі складає 20 м<sup>3</sup>. При цьому кількість теплоти знаходиться по формулі:

$$Q = m \cdot C_T (T_n - T_m) + L_n \cdot m + C_p \cdot m (T_b - T_n) = \rho \cdot V [C_T (T_n - T_m) + L_n + C_p (T_b - T_n)]$$

де  $m$  - маса кристалогідрату, кг;

$\rho$  - щільність кристалогідрату, 1,44 кг/дм<sup>3</sup>;

$V$  - об'єм накопичувача, м<sup>3</sup>;

$T_n$  - температура плавлення, 30 °C;

$T_m$  - температура нагріву, при якій починається плавлення, 32 °C;

$T_b$  - температура нагріву розчину в накопичувачеві теплоти, 50 °C;

$C_T$  - питома теплоємність твердої фази, 0,58 кДж/кг°C;

$C_p$  - питома теплоємність рідкої фази, 0,94 кДж/кг°C;

$L_n$  - теплота плавлення, 306 кДж/кг.

$$Q = 20 \cdot 10^3 \cdot 1,44 [0,58(33-30) + 306 + 0,94(50-30)] \cdot 10^3 = 9403 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 9,403 \text{ ГДж}$$

При використанні глауберової солі необхідний обсяг накопичувача складає по зворотному балансу:

$$9,21 \cdot 10^9 = V \cdot 10^3 \cdot 1,58 [0,54(21-17) + 186 + 1,0(50-18)] \cdot 10^3 = 331,2 \cdot 10^6$$

Об'єм накопичувача теплоти складає в цьому випадку:

$$V = \frac{9,21 \cdot 10^9}{331,2 \cdot 10^6} \approx 28 \text{ м}^3$$

При використанні традиційної генерації теплової енергії в водогрійних котлах, що працюють з середнім коефіцієнтом корисної дії  $\eta_k = 0,85$  витрата природного газу при його теплотвірній здатності  $Q_n^p = 8000$  ккал/м<sup>3</sup> складає за добу для конкретної будівлі:

$$V = \frac{2,2 \cdot 10^9}{8000 \cdot 0,85} = 323,5 \text{ м}^3$$

При ціні газу 600 дол/1000 м, тобто 4,8 грн/м витрати газу на обігрів складуть - 1553 грн/добу.

По запропонованій технології при базовій вартості електроенергії 0,3684 грн/кВтгод для споживачів, які витрачають більше 150 кВтгод/місяць (по тарифам НКРЕ з 01.04.2011 р.) ціна 1 кВтгод електроенергії буде складати з урахуванням коефіцієнту 0,35 (споживання електроенергії в позапіковий нічний період) - 0,129 грн/кВтгод. Враховуючи те, що в накопичувачеві практично вся спожита електроенергія перетворюється на тепло, то витрата електроенергії складе:

$$B_c = \frac{2,2 \cdot 10^6 \cdot 0,129}{860} \text{ грн/добу}$$

Таким чином, витрати на обігрів приміщення скорочуються майже в 5 разів.

Джерела інформації:

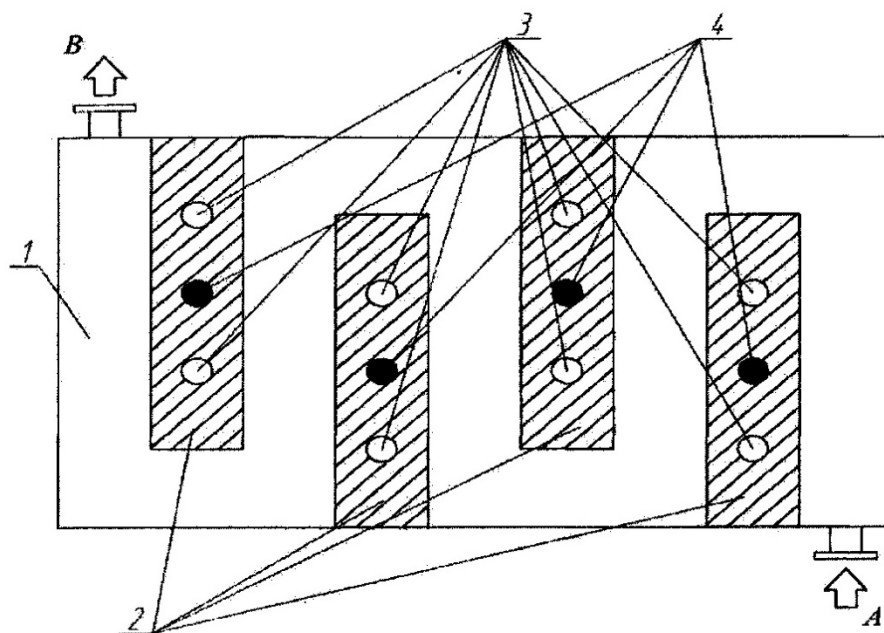
1. Л.П. Шелудько. Тепловой аккумулятор. СССР, 1985 р., бюлетень № 34, СУ 1179041а.

2. Г. Бекмен, П. Гилли. Тепловое аккумулирование энергии. Перевод с англ. Е.В. Сидорова, под редакцией д.т.н. профессора В.Н. Бродянского. - М.: "Мир", 1987. - С. 59-69 (прототип).

#### ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Пристрій для акумулювання тепла для теплопостачання, що включає секції, заповнені теплоакumuлюючою речовиною, який відрізняється тим, що секції акумулювання тепла розміщені послідовно в потоці води, що відбирає тепло, а ініціювання процесу кристалізації починають із останньої по ходу води секції, за допомогою ультразвукових пристроїв, що підключені до відповідних секцій.

UA 74690 U



Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601