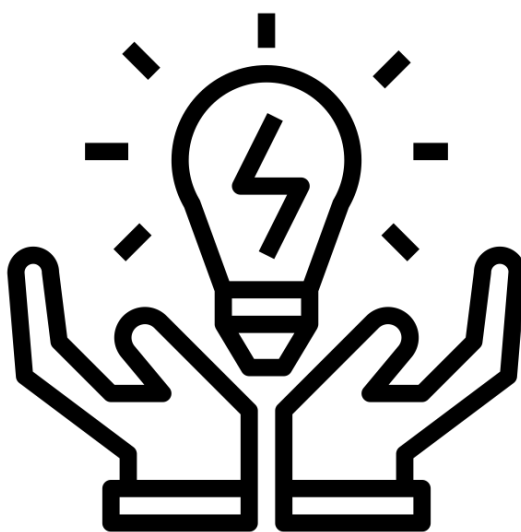


УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Ю.А. Рахманов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГО - И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ В  
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ



Санкт-Петербург

2018

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Ю.А. Рахманов**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ**  
**В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

**РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО**

по направлению подготовки (специальности) 18.03.02  
в качестве оценочных средств для реализации основных  
профессиональных образовательных программ высшего образования  
бакалавриата



**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2018

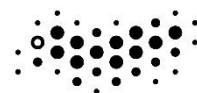
УДК 66.01. (075.8)

**Рахманов Ю.А.** Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2018.- 62 с.

**Рецензент: Цветков О.Б., доктор технических наук, профессор.**

Даны методические указания, вопросы для самоподготовки, задания для практических занятий и контрольных работ, справочные материалы и литература при изучении дисциплины «Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии».

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии квалификации бакалавр, а также может быть использовано для направления подготовки 18.04.02 и решения задач энерго- и ресурсоэффективности в промышленной экологии.



**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Университет ИТМО** – ведущий вуз страны в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

Университет ИТМО, 2018

Рахманов Ю.А., 2018

## **Оглавление**

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Введение .....</b>                                              | <b>4</b>  |
| <b>Основные разделы дисциплины .....</b>                           | <b>11</b> |
| <b>Вопросы для самоподготовки .....</b>                            | <b>13</b> |
| <b>Методические указания к выполнению контрольной работы .....</b> | <b>15</b> |
| <b>Задача 1 .....</b>                                              | <b>16</b> |
| <b>Задача 2 .....</b>                                              | <b>22</b> |
| <b>Задача 3 .....</b>                                              | <b>30</b> |
| <b>Задача 4 .....</b>                                              | <b>40</b> |
| <b>Список рекомендуемой литературы .....</b>                       | <b>50</b> |
| <b>Приложения .....</b>                                            | <b>52</b> |

## **Введение**

Настоящие методические указания (МУ) составлены для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии квалификации бакалавр.

Необходимыми условиями для освоения дисциплины являются:

- знание основных законов физики, химии, математики, вычислительной техники, механики жидкостей и газов, экологии, термодинамики и теплопередачи;
- умение использовать основные законы естественных наук в профессиональной деятельности для решения типовых и инженерных задач;
- владение навыками использования научно-технической и справочной литературы при решении прикладных задач.

Целью изучения дисциплины «Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии» является подготовка студентов в области теории рационального использования материальных и энергетических ресурсов в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии. В данном курсе представлены основные понятия теории ресурсосбережения и ресурсосберегающих технологий, способы и средства систем энергоснабжения, энергопотребления, энергосбережения и эффективного использования энергетических ресурсов, способы формирования энергетических, эксергетических уравнений и балансов, методы термодинамического, в том числе эксергетического, анализа энергетической эффективности генерирования и использования энергии, тенденции и перспективы развития современных ресурсосберегающих систем химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.

Изучение дисциплины формирует представление теории энерго- и ресурсосбережения и ресурсосберегающих технологий применительно к пищевым биотехнологическим технологиям и производствам. Студенты получают навыки в решении задач анализа и оптимизации технологических процессов и технологий с целью снижения потерь и затрат энергетических и материальных ресурсов, минимизации необходимого ресурсопотребления, должны научиться обоснованно выбирать методы анализа и оптимизации энерго- и ресурсосберегающих систем, выполнять оценку энерго- и ресурсопотребления,

интерпретировать и анализировать результаты построения энерго- и ресурсосберегающих систем.

В результате изучения дисциплины достигаются следующие результаты образования:

1) знания:

- нормативно-правовой базы по вопросам ресурсосбережения в РФ и за рубежом;
- классификации природных ресурсов;
- условий и процессов формирования природных ресурсов;
- теоретических основ ресурсосберегающих технологий;
- основных уравнений механики сплошных сред, термодинамики и тепло- и массообмена процессов, машин и аппаратов ресурсосберегающих технологий;
- принципов подхода к решению проблем ресурсосбережения на производствах;
- принципов построения ресурсосберегающих технологий;

2) умения:

- логически верно, аргументированно и ясно строить устную и письменную речь;
- анализировать отечественный и зарубежный опыт по исследованию теории и практике применения энергосберегающих технологий на промышленных производствах;
- систематизировать и обобщать информацию по формированию и использованию ресурсов предприятия с целью энерго- и ресурсосбережения;
- изучать научно-техническую информацию;
- владеть методами совершенствования технологических процессов и технологий с позиции энерго- и ресурсосбережения, минимизации воздействия на окружающую среду;

3) навыки:

- применения современных методов исследования производственных процессов с целью применения в них энергосберегающих технологий и энергоэффективных технологических процессов;

– использования компьютерных средств для повышения результативности в научно-исследовательской работе.

Целью освоения дисциплины является достижение следующих результатов обучения:

| Код компетенции | Код индикатора(ов) достижения компетенций | Планируемые результаты обучения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>ОПК-1</i>    | <i>ОПК-1.2</i>                            | <p>Знания:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- принципы подхода к решению стандартных задач энерго- и ресурсосбережения на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий;</li> </ul> <p>Умения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- использовать для решения стандартных задач энерго- и ресурсосбережения информационно-коммуникационные технологии с учетом требований информационной безопасности;</li> </ul> <p>Навыки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- методы анализа решения стандартных задач энерго- и ресурсосбережения с применением информационно-коммуникационных технологий.</li> </ul> |
| <i>ОПК-3</i>    | <i>ОПК-3.1</i>                            | <p>Знания:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- теоретические основы экологии;</li> <li>- условия и процессы формирования природных ресурсов;</li> <li>- основные уравнения механики сплошных сред, термодинамики, тепло- и массообмена процессов, машин и аппаратов ресурсосберегающих технологий;</li> <li>- принципы подхода к решению</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

|  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | <p>проблем ресурсосбережения на производствах и построения ресурсосберегающих технологий;</p> <p>Умения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- анализировать отечественный и зарубежный опыт по исследованию, теории и практике применения энерго- и ресурсосберегающих технологий в промышленных производствах;</li> <li>- систематизировать и обобщать информацию по формированию и использованию ресурсов предприятия с целью энерго- и ресурсосбережения;</li> <li>- изучать научно-техническую информацию;</li> </ul> <p>Навыки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- методы совершенствования технологических процессов с позиций энерго- и ресурсосбережения, минимизации воздействия на окружающую среду;</li> <li>- применять современные методы исследования производственных процессов с целью применения в них энерго- и ресурсосберегающих процессов и технологий;</li> <li>- использовать компьютерные средства для повышения результативности в научно-исследовательской работе.</li> </ul> |
|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Знания, полученные при изучении дисциплины «Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии», могут быть использованы в профессиональной деятельности для решения задач рационального использования природных и энергетических ресурсов с целью повышения эффективности химических, нефтехимических и биотехнологических производств.



Дисциплина изучается студентами на факультете пищевых биотехнологий и инженерии (ПБиИ). Учебным планом предусмотрены лекционные и практические занятия.

Студенты должны выполнить 4 домашних задания.

Домашнее задание №1. Основные характеристики технологических процессов, потребителей энергии и систем энергоснабжения пищевых биотехнологических производств.

Домашнее задание №2. Оценка энергетической эффективности генератора теплоты.

Домашнее задание №3. Оценка энергетической эффективности паросиловой установки.

Домашнее задание №4. Оценка энергетической эффективности теплообменного аппарата.

Решение домашних заданий представляется в печатной форме в формате А4.

Работа не может быть принята и подлежит доработке в случае:

- отсутствия необходимых расчётов и пояснений;
- отсутствия ответов на заданные в задании вопросы;
- низкого качества расчётов (ошибки, размерности);
- грамматических и синтаксических ошибок в тексте.

Студентами, обучающимися по заочной форме обучения, дисциплина изучается самостоятельно по учебно-методической литературе [1, 2, 3, 5, 7, 8] и закрепляется выполнением контрольной работы [4, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. При изучении разделов дисциплины, выполнении контрольной работы в соответствии с МУ, в случае отсутствия у студента необходимой литературы из рекомендуемого списка, можно пользоваться аналогичной литературой других авторов и Интернетом.

Кроме того, студенты могут прослушать установочные и обзорные лекции в период лабораторно-экзаменационной сессии в Университете ИТМО.

При возникновении вопросов в процессе изучения дисциплины студенты могут получать консультации в письменной или устной форме на факультете ПБиИ.

Изучение дисциплины рекомендуется осуществлять последовательно по темам, содержание и вопросы для самоподготовки по которым приведены в настоящих МУ. Переходить к изучению следующей темы рекомендуется только после полного усвоения предыдущей, составления ответов на вопросы и решения соответствующих задач.

В процессе изучения дисциплины студент, обучающийся по заочной форме обучения, должен выполнить контрольную работу, которая включает в себя решение и ответы на вопросы задач №1, 2, 3, 4 настоящих МУ.

После выполнения домашних заданий (студенты дневной формы обучения) и контрольной работы (студенты заочной формы обучения) студенты проходят собеседование по выполненным работам и допускаются к зачёту по дисциплине.

При собеседовании от студента требуется умение пояснить смысл и ход решения домашних заданий (задач контрольной работы), сделать выводы и рекомендации из полученных результатов. Также оценивается качество выполненной работы (аккуратность выполнения, качество расчётов, наличие грамматических и синтаксических ошибок в тексте).

Зачёт проходит в форме собеседования по темам дисциплины. Обучающемуся предлагается ответить на два вопроса, по одному вопросу из различных разделов дисциплины. Предъявляемые требования включают в себя знание теории и понимание физико-химической сущности явлений и процессов, умение применять основные теоретические положения и расчётные зависимости в решении практических задач.

Знания, умение и навыки обучающихся при промежуточной аттестации в форме зачёта определяются «зачтено» (для студентов дневной формы обучения минимальное количество баллов – 60, максимальное количество баллов – 100), «не зачтено» (для студентов дневной формы обучения количество баллов менее 60).

«Зачтено» - обучающийся знает курс на уровне лекционного материала, базового учебника, дополнительной учебной, научной и методологической литературы, умеет привести разные точки зрения по излагаемому вопросу. «Не зачтено» - обучающийся имеет пробелы в знаниях основного учебного материала, допускает принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий.

Автор признателен студентам факультета ПБиИ Кузнецовой А.Д. и Малышевой М.О., оказавшим помощь в технической работе над материалами учебно-методического пособия.

## **Основные разделы дисциплины**

Студенты изучают следующие разделы дисциплины «Теоретические основы энерго - и ресурсосбережения в химической технологии»:

Раздел 1. Энерго- и ресурсосберегающие технологии в пищевых биотехнологических производствах:

- основные технологические процессы при переработке сырья пищевых биотехнологий;
- основные потребители энергии (теплоты, холода, электрической энергии, сжатого воздуха и т.д.) и применяемые энергоносители;
- принципы расчёта потребления материальных и энергетических ресурсов пищевыми биотехнологическими производствами;
- особенности потребления энергии пищевыми биотехнологическими производствами;
- оценка эффективности использования сырья и энергии на пищевых биотехнологических производствах;
- побочные (вторичные) материальные и энергетические ресурсы пищевых биотехнологических производств и методы их рекуперации;
- энерготехнология пищевых биотехнологических производств.

Раздел 2. Системы энергоснабжения пищевых биотехнологических производств:

- принципиальная схема, основные стадии и элементы технологии энергоснабжения;
- классификация и основные элементы систем теплоснабжения;
- энергетические ресурсы (возобновляемые и невозобновляемые) систем энергоснабжения пищевых биотехнологических производств и перспективы их применения;
- энергетические установки для получения потребляемых видов энергии и энергоносителей.

Раздел 3. Методы анализа энергетической эффективности использования и генерирования энергии на пищевых биотехнологических производствах:

- энергетический метод;
- энтропийный метод;
- эксергетический метод;
- основные положения эксергетического метода анализа.

Раздел 4. Прикладные проблемы эффективного использования энергии на пищевых биотехнологических производствах:

- управление энергоиспользованием;
- применение энергоэффективного оборудования и устройств;
- внедрение прогрессивных способов водоподготовки и систем водоснабжения;
- использование в котельных газотурбинных надстроек и утилизационных паротурбинных агрегатов;
- применение «контактных» и «конденсационных» экономайзеров;
- совершенствование тепловой изоляции теплоиспользующих и теплогенерирующих систем;
- применение автономных источников энергоснабжения;
- применение когенерационных и тригенерационных установок;
- применение моно- и бивалентных систем энергоснабжения;
- использование аккумуляторов теплоты и холода;
- использование «естественного» холода;
- использование теплоты, выделяющейся в конденсаторах холодильных установок;
- применение тепловых насосов;
- внедрение регулируемого электрического привода;
- совершенствование и автоматизация систем освещения.

## Вопросы для самоподготовки

1. Актуальность и потенциал энергосбережения в России.
2. Типовая технологическая схема химического производства. Основные потребители теплоты, холода, механической и электрической энергии.
3. Основные энергоносители химических производств и их характеристики.
4. Состав энергетического комплекса химического предприятия.
5. Расчёт потребления теплоты химическим предприятием.
6. Расчёт потребления холода химическим предприятием.
7. Расчёт потребления механической энергии химическим предприятием.
8. Расчёт потребления электрической энергии химическим предприятием.
9. Оценка эффективности использования сырья химическим предприятием.
10. Оценка эффективности использования энергии химическим предприятием.
11. Причины потерь сырья и энергии химическим предприятием.
12. Методы анализа потребления энергии в химико-технологических системах.
13. Расчёт потребления первичных энергетических ресурсов (топлива) для получения потребляемых видов энергии.
14. Энергетические ресурсы и их использование.
15. Взаимосвязь технологических, энергетических и экологических аспектов в химических технологиях.
16. Основные положения энергетического метода анализа эффективности использования энергии в химических технологиях.
17. Основные положения энтропийного метода анализа эффективности использования энергии.
18. Основные положения эксергетического метода анализа эффективности использования энергии.
19. Понятие и физическая сущность эксергии.
20. Понятие об окружающей среде при эксергетическом анализе.
21. Анализ эффективности использования энергии при смешении потоков.
22. Виды эксергии.
23. Эксергетический анализ процессов теплопередачи.

24. Потери эксергии в процессе горения.
25. Классификация потерь эксергии.
26. Показатели эффективности использования энергии.
27. Показатели эффективности получения энергии.
28. Структурный анализ химико-технологических систем.
29. Вторичные энергетические ресурсы химических технологий и их использование.
30. Основные направления энерго- и ресурсосбережения в химических технологиях.
31. Понятие об энерготехнологии.
32. Технические средства утилизации теплоты.
33. Котлы-утилизаторы. Принцип работы, показатели эффективности.
34. Контактные экономайзеры. Принцип работы, показатели эффективности.
35. Тепловые насосы. Принцип работы, показатели эффективности.
36. Утилизационные паровые, газовые турбины, детандеры, паровинтовые, паровые машины, гидравлические турбины.

## Методические указания к выполнению контрольной работы

К выполнению контрольной работы следует приступать только после внимательного изучения соответствующего раздела курса. Кроме того, рекомендуется предварительно ознакомиться с ходом решения аналогичных задач по учебной литературе [13, 4, 6, 10, 14].

Контрольные задачи составлены по 100-вариантной (численной) системе, в которой исходные данные к каждой задаче выбираются из соответствующих таблиц (1, 2, 3) по последней и предпоследней цифрам шифра (личного номера) студента. Работы, выполненные не по своему варианту, не рассматриваются.

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие условия:

- 1) номера варианта (от 0 до 99) выбирать по последним двум цифрам шифра зачётной книжки;
- 2) полностью выписать условия задач и исходные данные;
- 3) решение задач сопровождать коротким пояснительным текстом, в котором указывать наименование определяемых величин, приводить формулы, числовые вычисления в единицах системы СИ, решение иллюстрировать схемами и графиками;
- 4) в тексте работы приводить ссылки на литературу, а в конце контрольной работы дать список использованной литературы;
- 5) в работе, направляемой на повторную проверку после исправлений, должны быть сохранены замечания рецензента;
- 6) работа должна быть подписана студентом;
- 7) следует иметь в виду, что приём контрольных работ на рецензии прекращается за 10 дней до начала лабораторно-экзаменационной сессии;
- 8) заданием на контрольные работы служат нижеприведенные условия задач 1, 2, 3, 4.



## Задача 1

### Энергетический анализ эффективности работы генератора теплоты

Заданы вид топлива, паропроизводительность котельного агрегата  $D$ , давление пара в котле  $P$ , температуры перегретого пара  $t_{\text{п}}$ , питательной воды  $t_{\text{пв}}$  и уходящих газов  $t_{\text{ух}}$ , величина продувки  $\beta$  и присосы холодного воздуха по газовому тракту  $\Delta\alpha$ .

Определить:

- состав рабочего топлива и его удельную низшую теплоту сгорания  $Q_{\text{н}}^{\text{Р}}$ ;
- способ сжигания топлива, тип топки, величину коэффициента избытка (расхода) воздуха в топке  $\alpha_{\text{т}}$  и за котельным агрегатом  $\alpha_{\text{ух}}$  (с учётом присоса воздуха по газовому тракту  $\Delta\alpha$ );
- теоретическую (калориметрическую) температуру горения при  $\alpha_{\text{т}}$ ;
- потери теплоты с уходящими газами  $q_2$ ;
- коэффициент полезного действия котельного агрегата брутто  $\eta_{\text{ка}}$ ;
- расход натурального и условного топлива для получения пара;
- испарительность натурального и условного топлива;
- объём топки и площадь зеркала горения колосниковой решётки (при сжигании твёрдого топлива) топочного устройства;
- объём и массу продуктов сгорания топлива, в том числе диоксидов углерода, серы, азота, водяных паров и золы (при сжигании твёрдого топлива);
- расход продуктов сгорания топлива, в том числе золы при сжигании твёрдого топлива).

Ответить на вопросы:

1. Как зависит теоретическая температура горения от коэффициента избытка воздуха и температуры воздуха перед топкой?
2. Как зависит потеря теплоты с уходящими газами от температуры уходящих газов и коэффициента избытка воздуха?

Изобразить схему котельной установки (теплогенерирующей установки) и привести её краткое описание.

Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 1.

Указания:

1. Состав и удельная низшая теплота сгорания топлива, а также рекомендации по выбору типа топки и значения коэффициента избытка воздуха в топке приведены в справочных таблицах 1-7 приложения.
2. При определении теоретической температуры горения температуру воздуха перед топкой принимать при сжигании газа и жидкого топлива (мазута) равной 25-30 °С, при сжигании твёрдого топлива – в соответствии с расчётными характеристиками топок, приведенными в таблице 4 приложения.
3. Определение теоретической температуры горения производить при помощи  $H-t$  диаграммы, для построения которой нужно предварительно вычислить при  $\alpha_t$  энтальпии дымовых газов при температурах 1500 и 2000 °С.

### Основные расчётные зависимости

Теоретически необходимое количество воздуха (при нормальных условиях) для полного сгорания единицы количества топлива:

– для твёрдого и жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V^0 = 0,0889C^p + 0,265H^p + 0,033(S_{\text{л}}^p - O^p),$$

где  $C^p, H^p, S_{\text{л}}^p, O^p$  – массовые содержания горючих компонентов и кислорода в рабочей массе топлива, %;

– для газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V^0 = 0,0476[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4}\right) C_m H_n - O_2],$$

где CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> – содержание горючих компонентов, кислорода и азота в газообразном топливе, %.

Объём трёхатомных газов:

– для твёрдого и жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 1,866 \frac{C^p + 0,375S_{\text{л}}^p}{100};$$

– для газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{RO_2} = 0,01(CO_2 + CO + H_2S + \sum m C_m H_n).$$

Теоретический объём азота:

– для твёрдого и жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,008N^p;$$

– для газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,01N_2.$$

Теоретический объём водяных паров:

– для твёрдого и жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{H_2O}^0 = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0161V^0;$$

– для газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01\left(\sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2S + H_2 + 0,124d_r + 1,61V^0\right),$$

где  $d_r = (5 \div 10)$  г/м<sup>3</sup> – влагосодержание газообразного топлива.

Теоретический объём дымовых газов, м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_r^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0.$$

Действительный объём дымовых газов, м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_r = V_r^0 + (\alpha - 1)V^0.$$

Энтальпия теоретического количества воздуха, кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>:

$$H_B^0 = V^0 C_{B3} t.$$

Энтальпия теоретического объёма дымовых газов, кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>:

$$H_r^0 = (V_{RO_2} C_{CO_2} + V_{N_2}^0 C_{N_2} + V_{H_2O}^0 C_{H_2O}) t.$$

Энтальпия действительного объёма дымовых газов при  $\alpha > 1$ , кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>:

$$H_r = H_r^0 + (\alpha - 1)H_B^0,$$

где  $C_{вз}, C_{CO_2}, C_{N_2}, C_{H_2O}$ , кДж/м<sup>3</sup>·К – удельные, объёмные, при постоянном давлении средние теплоёмкости воздуха, трёхатомных газов, азота и водяных паров (см. прил. табл. 8).

4. Величину потерь теплоты с уходящими газами  $q_2$ , %, определить по формуле:

$$q_2 = (H_{yx} - \alpha_{yx} \cdot H_{хв}^0) \cdot (100 - q_4) / Q_H^p,$$

где  $H_{yx}$  – энтальпия уходящих дымовых газов при  $\alpha_{yx}$  и  $t_{yx}$ , кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>;  $H_{хв}^0$  – энтальпия теоретического количества воздуха, поступившего в котельный агрегат при температуре 30 °С;  $Q_H^p$  – удельная низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>;  $q_4$  – потери теплоты от механической неполноты сгорания, %.

5. Величины потерь теплоты от химической  $q_3$ , механической неполноты сгорания  $q_4$  и от наружного охлаждения  $q_5$  принять согласно справочным таблицам 4, 5, 6 приложения.
6. Коэффициент полезного действия котельного агрегата брутто определяется по обратному балансу, %:

$$\eta_{ка} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6).$$

7. Расход топлива для получения пара, кг/с, м<sup>3</sup>/с:

$$B = \frac{D \cdot [h_{п} - h_{пв} + \frac{\beta}{100} (h_{кв} - h_{пв})] \cdot 100}{Q_H^p \eta_{ка}},$$

где  $D$ , кг/с – расход пара;  $h_{п}$ ,  $h_{пв}$ ,  $h_{кв}$ , кДж/кг – удельные энтальпии пара, питательной и котловой (кипящей) воды;  $\beta$ , % – величина продувки.

8. Испарительность топлива, кг/кг, кг/м<sup>3</sup>:

$$И = \frac{D}{B}.$$

9. Объём топки, м<sup>3</sup>:

$$V_T = \frac{BQ}{q_V}.$$

10. Площадь зеркала горения слоевых топок,  $\text{м}^2$ :

$$R = \frac{BQ}{q_R},$$

где  $q_V$ ,  $\text{кВт/м}^3$  и  $q_R$ ,  $\text{кВт/м}^2$  – тепловые напряжения (плотности теплового потока) топочного объёма и зеркала горения, принимаются в зависимости от выбранного способа сжигания топлива, типа топочного устройства и вида сжигаемого топлива (см. прил. табл. 4, 6).

11. Объёмный расход дымовых газов при нормальных условиях,  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$\dot{V}_r = B[V_r^0 + (\alpha_{yx} - 1)V^0].$$

12. Массовый расход:

– дымовых газов,  $\text{кг/с}$ :

$$G_r = B[V_{\text{RO}_2}\rho_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}\rho_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}\rho_{\text{H}_2\text{O}} + (\alpha_{yx} - 1)V^0\rho_{\text{вз}}],$$

– золы,  $\text{кг/с}$ :

$$G_z = \frac{BA^p}{100},$$

где  $A^p$ , % – массовое содержание золы в топливе,  $\rho_{\text{N}_2}$ ,  $\rho_{\text{CO}_2}$ ,  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\rho_{\text{вз}}$  – плотности при нормальных условиях, соответственно, азота, диоксида углерода, водяного пара и воздуха,  $\text{кг/м}^3$  [12].

Таблица 1

**Исходные данные для решения задач 1, 2**

| Последняя<br>цифра<br>шифра | P,<br>МПа | t <sub>пв</sub> , °С | t <sub>п</sub> , °С | Д, т/ч | Предпоследняя<br>цифра шифра | Топливо<br>(газопровод)                       | Δα   | β, % | t <sub>yx</sub> , °С | t <sub>ос</sub> , °С | P <sub>ос</sub> ,<br>МПа |
|-----------------------------|-----------|----------------------|---------------------|--------|------------------------------|-----------------------------------------------|------|------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| 0                           | 2,4       | 145                  | 370                 | 30     | 0                            | Газ. Брянск –<br>Москва                       | 0,2  | 3    | 120                  | 12                   | 0,1                      |
| 1                           | 1,4       | 102                  | 240                 | 20     | 1                            | Уголь.<br>Воркутинский Ж                      | 0,25 | 3,5  | 130                  | 14                   | 0,1                      |
| 2                           | 3,9       | 145                  | 450                 | 25     | 2                            | Уголь.<br>Черемховский Д                      | 0,27 | 4,5  | 135                  | 15                   | 0,1                      |
| 3                           | 0,9       | 80                   | Нас.                | 8      | 3                            | Газ биологический<br>животноводческих<br>ферм | 0,27 | 2,5  | 115                  | 16                   | 0,1                      |
| 4                           | 10,0      | 145                  | 500                 | 35     | 4                            | Мазут<br>Малосернистый 40                     | 0,3  | 2    | 150                  | 17                   | 0,1                      |
| 5                           | 4,5       | 145                  | 400                 | 25     | 5                            | Газ. Ставрополь –<br>Грозный                  | 0,32 | 4    | 110                  | 18                   | 0,1                      |
| 6                           | 2,0       | 102                  | 320                 | 20     | 6                            | Уголь. Назаровский<br>Б                       | 0,26 | 5    | 140                  | 19                   | 0,1                      |
| 7                           | 2,4       | 145                  | 350                 | 10     | 7                            | Уголь. Кизеловский<br>Г                       | 0,32 | 6    | 145                  | 20                   | 0,1                      |
| 8                           | 1,4       | 102                  | 250                 | 15     | 8                            | Газ. Оренбург –<br>Совхозное                  | 0,22 | 5,5  | 125                  | 14                   | 0,1                      |
| 9                           | 1,8       | 102                  | 320                 | 35     | 9                            | Уголь.<br>Подмосковный Б                      | 0,24 | 6,5  | 135                  | 15                   | 0,1                      |

## Задача 2

### Эксергетический анализ эффективности работы генератора теплоты

Оценка эффективности (экономичности) работы генератора теплоты с помощью энергетического коэффициента полезного действия (КПД) показывает какая доля теплоты, выделившейся при сгорании топлива или иного источника энергии, преобразуется в полезную теплоту в форме пара, горячей воды и т.д. Однако она не позволяет судить о том, насколько полно использована эксергия топлива, то есть о степени термодинамического совершенства преобразования энергии в генераторе теплоты. В ней не учитываются потери эксергии химической энергии топлива при его сжигании, потери эксергии, связанные с внешней необратимостью процессов, обусловленной разностью температур при теплообмене между источниками теплоты и рабочим телом [14].

Внешняя необратимость процесса не приводит к потерям энергии, т. к. одно и то же количество теплоты может быть передано от источника теплоты к рабочему телу при различной разности температур между ними, и поэтому не проявляется при энергетическом анализе, и не учитывается энергетическим КПД.

В то же время способность рабочего тела производить работу – эксергия – зависит от его температуры и таким образом внешняя необратимость приводит к потерям эксергии. Следовательно, внешняя необратимость, наряду с внутренней необратимостью процессов, проявится при эксергетическом анализе генератора теплоты.

Применяя 2-й закон термодинамики в форме «эксергетического» баланса, можно определить эксергетический КПД -  $\eta_{\text{exka}}$  генератора теплоты [4,14]. На рисунке 1 схематически показаны потоки рабочих тел в паровом котельном агрегате с указанием их эксергетических характеристик:

– удельные эксергии топлива –  $e_{\text{т.л}}$ , кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>, воздуха –  $e_{\text{вз}}$ , кДж/м<sup>3</sup>, водяного пара –  $e_{\text{п}}$ , кДж/кг, питательной воды –  $e_{\text{пв}}$ , кДж/кг, котловой воды –  $e_{\text{кв}}$ , кДж/кг, дымовых газов –  $e_{\text{г}}$ , кДж/м<sup>3</sup>;

– расходы топлива –  $B$ , кг/с, м<sup>3</sup>/с, воздуха –  $\dot{V}_{\text{вз}}$ , м<sup>3</sup>/с, пара –  $D$ , кг/с, питательной воды –  $D_{\text{пв}}$ , кг/с, продувочной воды –  $D_{\text{пр}}$ , кг/с, дымовых газов –  $\dot{V}_{\text{г}}$ , м<sup>3</sup>/с;

– потери эксергетической мощности на наружное охлаждение (через тепловую изоляцию) –  $D_{\text{ено}}$ , кВт и при продувке –  $D_{\text{епр}}$ , кВт.

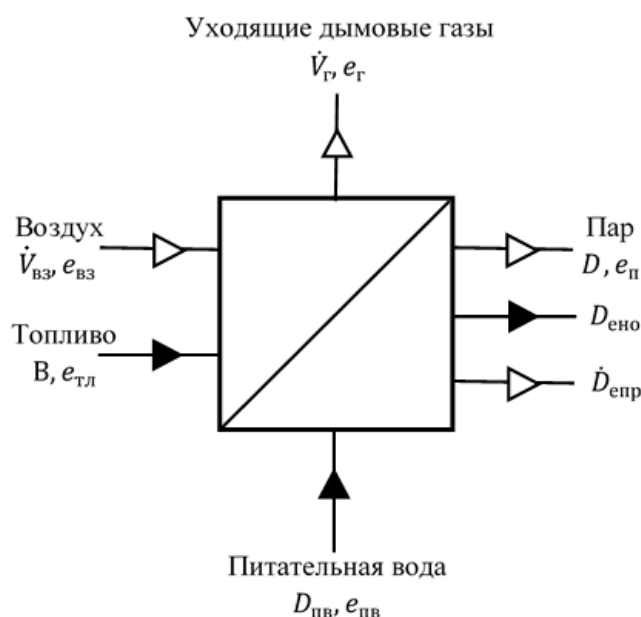


Рисунок 1. Потоки рабочих тел и энергии в паровом котельном агрегате

Эксергетический баланс между подведёнными и отведёнными потоками эксергии:

$$B \cdot e_{\text{тл}} + \dot{V}_{\text{вз}} \cdot e_{\text{вз}} + D \cdot (1 + \beta) \cdot e_{\text{пв}} = \dot{V}_{\text{г}} \cdot e_{\text{г}} + D \cdot e_{\text{п}} + D \cdot \beta \cdot e_{\text{кв}} + D_e, \text{ кВт.}$$

Воздух подводится из окружающей среды при  $t_{\text{вз}} = t_{\text{ос}}$ , поэтому  $e_{\text{вз}} = 0$ , тогда:

$$B \cdot e_{\text{тл}} = D \cdot (e_{\text{п}} - e_{\text{пв}}) + D \cdot \beta \cdot (e_{\text{кв}} - e_{\text{пв}}) + \dot{V}_{\text{г}} \cdot e_{\text{г}} + D_e, \text{ кВт.}$$

Полученное уравнение аналогично уравнению балансов энергетических потоков. Оно показывает, что внесённый с топливом поток эксергии расходуется на повышение эксергии питательной воды и водяного пара, частично отводится с уходящими дымовыми газами, продувочной водой, и кроме того компенсирует потери эксергетической мощности вследствие необратимости процессов горения, передачи тепловой мощности от дымовых газов к питательной воде и водяному пару и на наружное охлаждение ( $D_e$ ) [4, 14].

Эксергия уходящих дымовых газов практически не используется, поэтому её можно рассматривать как потерю эксергии.

Аналогично энергетическому КПД котельного агрегата можно определить его эксергетический КПД:



$$\eta_{\text{ехка}} = \frac{D \cdot (e_{\text{п}} - e_{\text{пв}})}{B \cdot e_{\text{тл}}} = 1 - \frac{D \cdot \beta \cdot (e_{\text{кв}} - e_{\text{пв}}) + \dot{V}_{\text{г}} \cdot e_{\text{г}} + D_{\text{е}}}{B \cdot e_{\text{тл}}},$$

который показывает какая часть внесённой эксергии топлива расходуется на требуемое повышение эксергии воды и водяного пара. Эксергетический КПД котельного агрегата в отличие от энергетического КПД оценивает термодинамическую эффективность преобразования энергии в котельном агрегате. При обратимом протекании процессов и отсутствии потерь с уходящими дымовыми газами ( $t_{\text{г}} = t_{\text{ос}}$ ) и на наружное охлаждение ( $t_{\text{нп}} = t_{\text{ос}}$ ) он был бы равен единице.

В целях упрощения для дальнейшего анализа можно пренебречь потерями теплоты и эксергии при продувке.

Тогда при  $e_{\text{п}} - e_{\text{пв}} = h_{\text{п}} - h_{\text{пв}} - T_{\text{ос}} \cdot (S_{\text{п}} - S_{\text{пв}})$ :

$$\eta_{\text{ка}} = \frac{D \cdot (h_{\text{п}} - h_{\text{пв}})}{B \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \text{ и } \eta_{\text{ехка}} = \frac{D \cdot (e_{\text{п}} - e_{\text{пв}})}{B \cdot e_{\text{тл}}}.$$

$$\text{Получаем: } \eta_{\text{ехка}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{h_{\text{п}} - h_{\text{пв}}} \cdot \eta_{\text{ка}} \cdot \frac{(e_{\text{п}} - e_{\text{пв}})}{e_{\text{тл}}}$$

$$\text{или } \eta_{\text{ехка}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{e_{\text{тл}}} \cdot \eta_{\text{ка}} \cdot \left[ 1 - \frac{T_{\text{ос}} \cdot (S_{\text{п}} - S_{\text{пв}})}{h_{\text{п}} - h_{\text{пв}}} \right]$$

Полученное выражение показывает, что эксергетический КПД котельного агрегата зависит от свойств топлива и КПД котельного агрегата ( $\frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{e_{\text{тл}}} \cdot \eta_{\text{ка}}$ ), учитывающих также потери теплоты с уходящими дымовыми газами, на наружное охлаждение, от химической и механической неполноты сгорания, а также от параметров состояния питательной воды и отпускаемого пара, что отражает потери эксергии вследствие необратимости процессов горения и теплообмена между дымовыми газами, водой и водяным паром.

Наглядно представить изменение состояния питательной воды и водяного пара в котельном агрегате можно с помощью  $T$ - $S$  диаграммы (см. рис. 2).

Питательная вода, поступающая в котельный агрегат при температуре  $T_{\text{нв}} = T_1$ , сначала подогревается до температуры кипения  $T_{\text{нт}} = f(P)$ , а затем кипит при  $T_{\text{нт}} = T(P)$  с последующим перегревом до температуры отпускаемого пара  $T_{\text{н}} = T_2$ . Площадь под изобарой при давлении в

котельном агрегате  $P$  показывает количество теплоты, воспринятое водой в котельном агрегате:

$$q_{ка} = h_{п} - h_{пв}.$$

Площадь между изобарой  $P$  и изотермой при температуре окружающей среды  $T_{oc}$  показывает количество эксергии, воспринятое водой [4, 14]:

$$e_{п} - e_{пв} = h_{п} - h_{пв} - T_{oc} \cdot (S_{п} - S_{пв}).$$

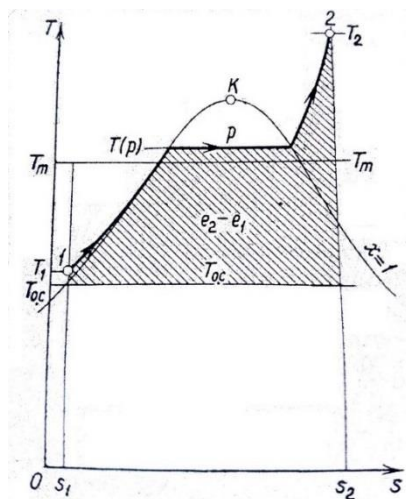
Если ввести понятие среднетермодинамической температуры рабочего тела при подводе теплоты:

$$T_m = \frac{h_{п} - h_{пв}}{S_{п} - S_{пв}},$$

$$\text{где } S_{п} = S_2, S_{пв} = S_1,$$

то для эксергетического КПД котельного агрегата можно получить выражение через среднетермодинамические температуры:

$$\eta_{ехка} = \frac{Q_{н}^p}{e_{т.л}} \cdot \eta_{ка} \cdot \left(1 - \frac{T_{oc}}{T_m}\right).$$



**Рисунок 2. Изобарное изменение состояния воды в парогенераторе**

Полученное выражение показывает, что для повышения эксергетического КПД котельного агрегата должна быть как можно более высокая среднетермодинамическая температура подвода теплоты,

например, путём повышения давления  $P$ , температуры  $T_{\text{п}}$  пара, питательной воды  $T_{\text{пв}}$ .

### Пример расчёта

В котельный агрегат поступает питательная вода при температуре  $t_{\text{пв}} = 70^\circ$  под давлением  $P = 10$  МПа, нагревается и кипит. Полученный насыщенный водяной пар перегревается до температуры  $t_{\text{п}} = 530^\circ\text{C}$  и поступает к потребителю. Расход пара составляет  $D = 21$  т/ч. Топливо – Саратовский природный газ, у которого удельная низшая теплота сгорания равна  $Q_{\text{н}}^{\text{P}} = 35500$  кДж/м<sup>3</sup>, объёмное количество дымовых газов при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,2$  равно  $V_{\text{г}} = 12,521$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, их максимальная (калориметрическая) температура равна  $t_{\text{к}} = 1850^\circ\text{C}$ , температура уходящих дымовых газов –  $t_{\text{ух}} = 140^\circ\text{C}$ , средняя изобарная объёмная теплоёмкость в интервале температур  $t_{\text{к}} - t_{\text{ух}}$   $C_{\text{рг}}$  равна 1,5 кДж/(м<sup>3</sup> · °C). Энергетический КПД котельного агрегата составляет  $\eta_{\text{ка}} = 0,9$ . Параметры окружающей среды: температура  $t_{\text{ос}} = 15^\circ\text{C}$ , давление  $P_{\text{ос}} = 0,1$  МПа.

Определить расход топлива, потери эксергии и эксергетический КПД котельного агрегата.

Предварительно перед проведением расчёта определяются термодинамические характеристики рабочих тел с помощью таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара [11].

#### Энтальпии (h) и энтропии (S) пара и воды:

*Водяной пар:*  $t_{\text{п}} = 530^\circ\text{C}$ ,  $P = 10$  МПа,  $h_{\text{п}} = 3450$  кДж/кг,  $S_{\text{п}} = 6,695$  кДж/(кг·K);

*Питательная вода:*  $t_{\text{пв}} = 70^\circ\text{C}$ ,  $P = 10$  МПа,  $h_{\text{пв}} = 301,2$  кДж/кг,  $S_{\text{пв}} = 0,9479$  кДж/(кг·K);

*Вода (состояние окружающей среды):*  $t_{\text{ос}} = 15^\circ\text{C}$ ,  $P = 0,1$  МПа,  $h_{\text{ос}} = 63$  кДж/кг,  $S = 0,2236$  кДж/(кг·K).

Расход топлива:

$$B = \frac{D \cdot (h_{\text{п}} - h_{\text{пв}})}{Q_{\text{н}}^{\text{P}} \cdot \eta_{\text{ка}}} = \frac{21000 \cdot (3450 - 301,2)}{35500 \cdot 0,9} = 2069,634 \text{ м}^3/\text{ч}$$

При выполнении упрощённых эксергетических расчётов с достаточной точностью можно принять эксергию топлива равной его теплоте сгорания [4, 14]:  $e_{\text{тл}} = Q_{\text{н}}^{\text{P}}$ ,  $e_{\text{тл}} = 35500$  кДж/м<sup>3</sup>.

Эксергия дымовых газов, образующихся в топке котельного агрегата:

$$e_{\text{дг}}^{\tau} = Q_{\text{н}}^{\text{p}} \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{ос}}}{T_{\text{к}}}\right) = 35500 \cdot \left(1 - \frac{273 + 15}{273 + 1850}\right) = 30684,173 \text{ кДж/м}^3.$$

Потери эксергии при адиабатном горении:

$$d_{\text{е гор}} = e_{\text{тл}} - e_{\text{дг}}^{\tau} = 35500 - 30684,173 = 4815,827 \text{ кДж/м}^3$$

или в %:

$$\bar{d}_{\text{е гор}} = \frac{e_{\text{тл}} - e_{\text{дг}}^{\tau}}{e_{\text{тл}}} \cdot 100 = \frac{35500 - 30684,173}{35500} \cdot 100 = 13,566\%.$$

Снижение эксергии дымовых газов при передаче теплоты питательной воде и водяному пару в котельном агрегате:

$$\begin{aligned} \Delta e_{\text{дг}}^{\text{ка}} &= V_{\text{г}} \cdot C_{\text{пр}} \cdot \left[ (t_{\text{к}} - t_{\text{yx}}) - T_{\text{ос}} \cdot \ln \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{yx}}} \right] = \\ &= 12,571 \cdot 1,5 \cdot \left[ (1850 - 140) - (273 + 15) \cdot \ln \frac{(273 + 1850)}{(273 + 140)} \right] = \\ &= 23295,084 \text{ кДж/м}^3, \end{aligned}$$

$$\text{где } V_{\text{г}} = V_{\text{г}}^{\circ} + (\alpha - 1) \cdot V^{\circ} = 12,521 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Приращение эксергии воды при получении перегретого водяного пара:

$$\begin{aligned} \Delta e_{\text{п}} &= \frac{D}{B} \cdot [(h_{\text{п}} - h_{\text{пв}}) - T_{\text{ос}} \cdot (S_{\text{п}} - S_{\text{пв}})] = \\ &= \frac{2100}{2069,634} \cdot [(3450 - 301,2) - (273 + 15) \cdot (6,695 - 0,9479)] = \\ &= 151555,5 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Потери эксергии в процессе теплообмена между дымовыми газами и водой при получении перегретого водяного пара:

$$d_{\text{ет}} = \Delta e_{\text{дг}}^{\text{ка}} - \Delta e_{\text{п}} = 23295,084 - 151555,5 = 8139,584 \text{ кДж/м}^3.$$

или в %:

$$\bar{d}_{\text{ет}} = \frac{\Delta e_{\text{дг}}^{\text{ка}} - \Delta e_{\text{п}}}{e_{\text{тл}}} \cdot 100 = \frac{8139,584}{35500} \cdot 100 = 22,93\%.$$

Эксергетический КПД котельного агрегата:

$$\eta_{\text{ехка}} = \frac{\Delta e_{\text{п}}}{e_{\text{тл}}} = \frac{15155,5}{35500} = 0,427.$$

или в %:

$$\eta_{\text{ехка}} = \frac{\Delta e_{\text{п}}}{e_{\text{тл}}} \cdot 100 = \frac{15155,5}{35500} \cdot 100 = 42,7\%$$

Потери эксергии с уходящими дымовыми газами, неучтёнными потерями (неполнота сгорания, на наружное охлаждение) можно определить на основе эксергетического баланса котельного агрегата [14]:

$$\begin{aligned} e_{\text{тл}} &= \Delta e_{\text{п}} + d_{\text{е гор}} + d_{\text{ет}} + d_{\text{е ух}} \\ d_{\text{е ух}} &= e_{\text{тл}} - (\Delta e_{\text{п}} + d_{\text{е гор}} + d_{\text{ет}}) = \\ &= 35500 - (15155,5 + 4815,827 + 8139,584) = \\ &= 7389,089 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

или в %:

$$\bar{d}_{\text{е ух}} = \frac{7389,089}{35500} \cdot 100 = 20,81\%.$$

Оценка эксергетического КПД котельного агрегата через среднетермодинамическую температуру подвода теплоты [14]:

$$\begin{aligned} T_m &= \frac{h_{\text{п}} - h_{\text{пв}}}{s_{\text{п}} - s_{\text{пв}}} = \frac{3450 - 301,2}{6,695 - 0,9479} = 547,894 \text{ К.} \\ \eta_{\text{ехка}} &= \eta_{\text{ка}} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{e_{\text{тл}}} \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{ос}}}{T_m}\right) = 0,9 \cdot \frac{35500}{35500} \cdot \left(1 - \frac{273 + 15}{273 + 547,894}\right) = 0,4269 \end{aligned}$$

или в %:

$$\eta_{\text{ехка}} = \eta_{\text{ка}} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{e_{\text{тл}}} \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{ос}}}{T_m}\right) \cdot 100 = 42,69\%.$$

Исходные данные для решения задачи 2 выбрать из таблицы 1, аналогично задаче 1.

Заданы: паропроизводительность котельного агрегата –  $D$ , давление пара в котле –  $P$ , температура пара –  $t_{\text{п}}$ , питательной воды –  $t_{\text{пв}}$ , уходящих

дымовых газов –  $t_{yx}$ , вид топлива, величина продувки –  $\beta$ , температура –  $t_{oc}$  и давление окружающей среды –  $P_{oc}$ .

Определить потери эксергии и эксергетический КПД парового котельного агрегата.

Ответить на вопросы:

1. Как зависят потери эксергии при горении от температуры горения?
2. Как зависят потери эксергии от коэффициента избытка воздуха в топке?
3. Какие мероприятия целесообразны для повышения эксергетического КПД котельного агрегата?

### Задача 3

#### Эксергетический анализ паротурбинной установки

Теплоэнергетическая паротурбинная установка предназначена для получения механической энергии, используемой для получения электрической энергии с помощью электрического генератора или рабочей машины (насос, компрессор и т. д.) за счёт подводимой теплоты.

На рис. 3 и 4 представлены схема (рис. 3) и термодинамический цикл в  $T$ - $S$  диаграмме (рис. 4) простейшей паротурбинной установки [4].

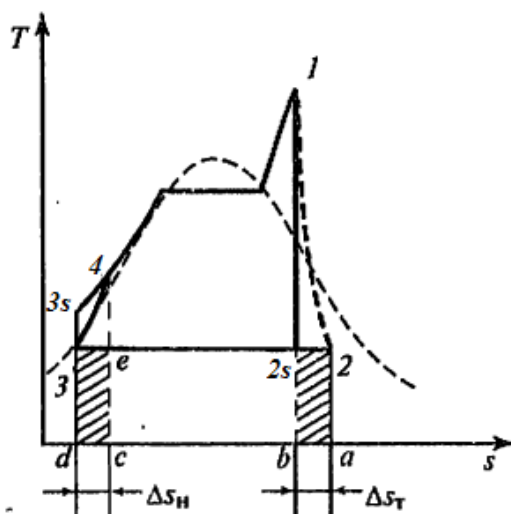


Рисунок 3. Термодинамический цикл работы простейшей паротурбинной установки в  $T$ - $S$  диаграмме

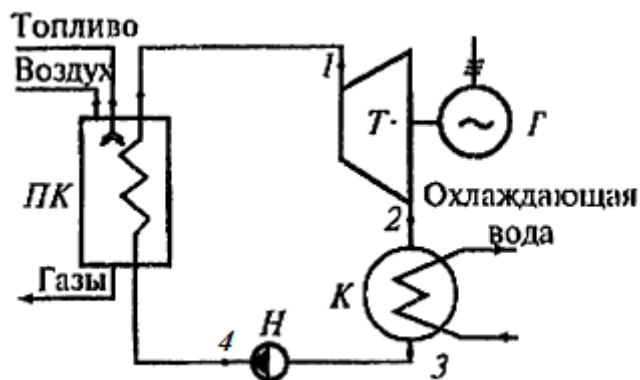


Рисунок 4. Схема простейшей паротурбинной установки

Теплоэнергетическая паротурбинная установка (ПТУ) включает в себя котельный агрегат (КА), в котором за счёт теплоты сгорания топлива или иного источника энергии получается водяной пар под давлением  $P_1$  при температуре  $T_1$  (состояние 1), который затем в паровом двигателе, в данном случае паровой турбине (ПТ), расширяется до давления в

конденсаторе (**К**)  $P_k$  (состояние 2) и конденсируется (состояние 3). С помощью питательного насоса (**ПН**) давление полученного конденсата повышается до давления в котельном агрегате (**КА**) –  $P_1$  (состояние 4).

Так как работа, затрачиваемая питательным насосом (**ПН**) на повышение давления конденсата, незначительна, то в  $T-S$  диаграмме точки 3 и 4 практически совпадают. Также в целях упрощения пренебрегаем снижением давления пара в котельном агрегате (**КА**) и паропроводе, по которому пар из котельного агрегата (**КА**) поступает в паровую турбину (**ПТ**).

Совершаемая паром в паровой турбине работа используется для привода электрического генератора (**ЭГ**) или рабочей машины, а также питательного насоса (**ПН**). В результате совершаемого кругового процесса в установке должно быть обеспечено наиболее полное преобразование энергии, полученной в котельном агрегате, в полезную работу для привода электрического генератора (**ЭГ**) или рабочей машины ( $W_i$ ) [4].

Эффективность такого преобразования можно оценить с помощью внутреннего КПД:

$$\eta_i = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} = \frac{W_i}{h_1 - h_4}.$$

Или эксергетического КПД:

$$\eta_{ex} = \frac{W_i}{e_1 - e_4},$$

где  $W_i$  – удельная внутренняя работа паротурбинной установки, кДж/кг;  $h_3, h_4, h_1, h_2$  – удельные энтальпии, соответственно, конденсата (состояния 3 и 4) и водяного пара (состояния 1 и 2), кДж/кг;  $e_1, e_4$  – удельные эксергии, соответственно, водяного пара (состояние 1) и конденсата (состояние 4), кДж/кг.

Эксергетический КПД показывает, какая часть воспринятой в котельном агрегате эксергии используется в виде полезной работы.

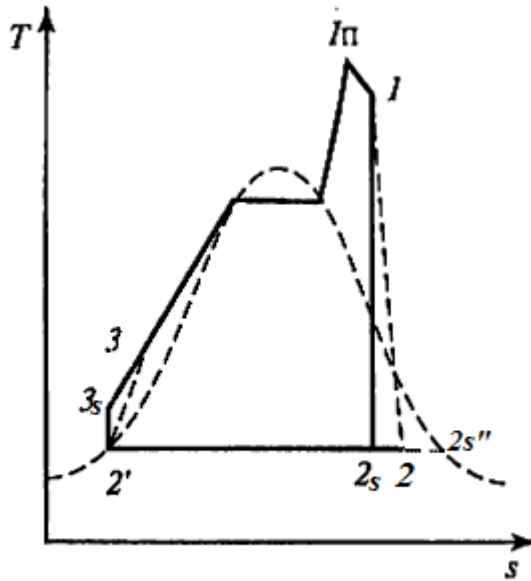
Для оценки потерь эксергии по месту их проявления можно произвести следующие преобразования выражения внутренней работы [4]:

$$\begin{aligned} W_i &= h_1 - h_2 - (h_4 - h_3) \\ &= e_1 - e_2 - (e_4 - e_3) + T_{oc}[(S_1 - S_2) - (S_4 - S_3)]; \\ W_i &= e_1 - e_2 - (e_4 - e_3) - T_{oc}[(S_1 - S_2) + (S_4 - S_3)]; \end{aligned}$$



$$W_i = (e_1 - e_2) - (e_4 - e_3) - d_{\text{епт}} - d_{\text{епн}},$$

где  $e_4, e_2$  – удельные эксергии, соответственно, конденсата (состояние 4), водяного пара (состояние 2), кДж/кг;  $S_3, S_4, S_1, S_2$  – удельные энтропии, соответственно, конденсата (состояние 3, 4) и водяного пара (состояние 1, 2), кДж/(кг·К);  $T_{\text{ос}}$  – температура окружающей среды, К;  $d_{\text{епт}}, d_{\text{епн}}$  – удельные потери эксергии, соответственно, в турбине и питательном насосе, кДж/кг.



**Рисунок 5. Термодинамический цикл работы паротурбинной установки с учетом потерь давления водяного пара в паропроводе между котельным агрегатом и паровой турбиной**

Полученное выражение показывает, что полезная внутренняя работа равна разности эксергии, воспринятой в котельном агрегате ( $e_1 - e_4$ ), и потерь эксергии в конденсаторе ( $e_2 - e_3$ ), турбине ( $d_{\text{епт}}$ ) и питательном насосе ( $d_{\text{епн}}$ ).

С учётом полученной зависимости эксергетический КПД паротурбинной установки можно определять через потери эксергии:

$$\eta_{\text{ex}} = 1 - \frac{e_4 - e_3}{e_1 - e_4} - \frac{d_{\text{епт}} + d_{\text{епн}}}{e_1 - e_4}.$$

Потери эксергии теплоты конденсирующегося водяного пара в конденсаторе:

$$d_{\text{ек}} = e_2 - e_3 = (T_3 - T_{\text{ос}}) \cdot (S_2 - S_3) = \frac{T_3 - T_{\text{ос}}}{T_3} \cdot x_2 \cdot r_0,$$

где  $x_2$  – степень сухости пара на входе в конденсатор;  $r_0$  – удельная теплота конденсации в конденсаторе при  $P_k$  и  $T_k$ , кДж/кг.

В качестве примера эксергетического анализа паротурбинной установки можно рассмотреть расчёт энергетических и эксергетических характеристик паротурбинной установки, работающей на водяном паре, отпускаемом котельным агрегатом, под давлением  $P_{\pi} = 10$  МПа, при температуре  $t_{\pi} = 530$  °С, работающем на Саратовском природном газе с теплотой сгорания  $Q_{\pi}^p = 35500$  кДж/м<sup>3</sup>, давление пара на входе в турбину  $P_1 = 9,5$  МПа, температура пара на входе в турбину  $t_1 = 520$  °С, давление пара в конденсаторе  $P_2 = 4$  кПа, КПД котельного агрегата  $\eta_{KA} = 0,9$ , внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{oi}^{пт} = 0,8$ , питательного насоса  $\eta_{oi}^{пн} = 0,75$ , механический КПД  $\eta_m = 0,99$ . Температура окружающей среды  $t_{oc} = 15$  °С, давление окружающей среды  $P_{oc} = 0,1$  МПа [4].

На рис. 5 в  $T$ - $S$  диаграмме представлен термодинамический цикл работы паротурбинной установки с учётом потерь давления водяного пара в главном паропроводе между котельным агрегатом и паровой турбиной. Характерные точки цикла: 1 – состояние пара на входе в турбину,  $2_s$  – состояние пара на выходе из турбины при изоэнтروпийном расширении,  $2$  – тоже при действительном процесс расширения,  $2_s''$  – состояние насыщенного пара при давлении в конденсаторе,  $2'$  – состояние конденсата в конденсаторе при температуре конденсации,  $3_s$  – состояние конденсата в конце изоэнтروпийного процесса повышения давления в питательном насосе,  $3$  – состояние конденсата в конце действительного процесса повышения давления в питательном насосе,  $1_{\pi}$  – состояние водяного пара на выходе из котельного агрегата.

### Расчёт энергетических характеристик

Вначале определяем термодинамические характеристики воды и водяного пара в характерных точках термодинамического цикла [4, 11].

Энтальпия пара в конце изоэнтропийного расширения пара в турбине определяется из условия:

$$S_{2s} = S_1.$$

Если пар в конце изоэнтропийного расширения попадает в область влажного пара, то в начале рассчитывается степень сухости пара в конце изоэнтропийного расширения:

$$x_{2s} = \frac{S_{2s} - S'_2}{S''_2 - S'_2} = \frac{6,691 - 0,4228}{8,473 - 0,4228} = 0,778.$$

|                         |                           |                                               |                                                             |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| $P_n = 10 \text{ МПа}$  | $t_n = 530^\circ\text{C}$ | $h_n = 3449 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$     | $S_n = 6,694 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$   |
| $P_1 = 9,5 \text{ МПа}$ | $t_1 = 520^\circ\text{C}$ | $h_1 = 3430 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$     | $S_1 = 6,691 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$   |
| $P_2 = 4 \text{ кПа}$   | $t_2 = 29^\circ\text{C}$  | $h'_2 = 121,53 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  | $S'_2 = 0,4228 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ |
|                         |                           | $h''_2 = 2554 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   | $S''_2 = 8,473 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ |
| $P_n = 10 \text{ МПа}$  |                           | $h_{3s} = 134,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ |                                                             |

Затем рассчитывается энтальпия пара в конце изоэнтропийного расширения:

$$h_{2s} = (1 - x_{2s}) \cdot h'_2 + x_{2s} h''_2;$$

$$h_{2s} = (1 - 0,778) \cdot 121,53 + 0,778 \cdot 2554 = 2013,992 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия пара в конце действительного процесса расширения:

$$h_2 = h_1 - \eta_{oi}^{пр} (h_1 - h_{2s});$$

$$h_2 = 3430 - 0,8 \cdot (3430 - 2013,992) = 2297,193 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Степень сухости пара в конце действительного процесса расширения:

$$x_2 = \frac{h_2 - h'_2}{h''_2 - h'_2} = \frac{2297,193 - 121,53}{2554 - 121,53} = 0,894.$$

Энтропия пара в конце действительного процесса расширения:

$$S_2 = (1 - x_2) \cdot S'_2 + x_2 S''_2;$$

$$S_2 = (1 - 0,894) \cdot 0,4228 + 0,894 \cdot 8,473 = 7,619 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Энтальпия воды в конце действительного процесса повышения давления в питательном насосе:

$$h_3 = h'_2 + \frac{h_{3s} - h'_2}{\eta_{oi}^{пн}} = 121,53 + \frac{134,8 + 121,53}{0,75} = 139,223 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Энтропия воды в конце действительного процесса повышения давления воды в питательном насосе определяется по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара [11] в зависимости от давления и энтальпии. При  $P_1 = 10$  МПа и  $h_3 = 139,223$  кДж/кг энтропия  $S_3 = 0,433$  кДж/(кг·К).

Внутренний КПД паротурбинной установки:

$$\eta_i^{пту} = \frac{[(h_1 - h_2) - (h_3 - h'_2)]}{h_n - h_3};$$

$$\eta_i^{пту} = \frac{[(3430 - 2297,193) - (139,233 - 121,53)]}{3449 - 139,233} = 0,337.$$

КПД главного паропровода:

$$\eta_{пп} = \frac{h_1 - h_3}{h_n - h_3} = \frac{3430 - 139,233}{3449 - 139,233} = 0,994.$$

Эффективный КПД паротурбинной установки:

$$\eta_e^{пту} = \eta_{КА} \cdot \eta_i^{пту} \cdot \eta_m = 0,9 \cdot 0,337 \cdot 0,99 = 0,3.$$

### Расчёт эксергетических характеристик

Термодинамические характеристики воды при параметрах окружающей среды [11]:

$$P_{oc} = 0,1 \text{ МПа}, t_{oc} = 15^\circ\text{C}, h_{oc} = 63 \text{ кДж/кг}, S_{oc} = 0,2236 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Эксергии воды и пара в характерных точках цикла:

$$e_n = (h_n - h_{oc}) - T_{oc}(S_n - S_{oc}) = 3449 - 63 - 288 \cdot (6,694 - 0,2236)$$

$$= 1522,524 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$e_1 = (h_1 - h_{oc}) - T_{oc}(S_1 - S_{oc}) = 3430 - 63 - 288 \cdot (6,691 - 0,2236)$$

$$= 1504,388 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$e_{2s} = (h_{2s} - h_{oc}) - T_{oc}(S_{2s} - S_{oc})$$

$$= 2013,992 - 63 - 288 \cdot (6,691 - 0,2236) = 83,38 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$e_2 = (h_2 - h_{oc}) - T_{oc}(S_2 - S_{oc}) = 2297,193 - 63 - 288 \cdot (7,619 - 0,2236) = 104,317 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$e'_2 = (h'_2 - h_{oc}) - T_{oc}(S'_2 - S_{oc}) = 121,53 - 63 - 288 \cdot (0,4228 - 0,2236) = 1,1604 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$e_{3s} = (h_{3s} - h_{oc}) - T_{oc}(S_{3s} - S_{oc}) = 134,8 - 63 - 288 \cdot (0,4228 - 0,2236) = 14,4304 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$e_3 = (h_3 - h_{oc}) - T_{oc}(S_3 - S_{oc}) = 139,223 - 63 - 288 \cdot (0,433 - 0,2236) = 15,916 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Для осуществления рабочего цикла паротурбинной установки затрачивается эксергия химической энергии топлива, сжигаемого в топке котельного агрегата. Численно она может быть принята равной его низшей теплоте сгорания  $Q_H^p = 35500$  кДж/кг.

При расчёте на 1 кг пара затрата эксергии топлива составит:

$$e_{\text{тл}} = \frac{h_n - h_3}{\eta_{\text{ка}}} = \frac{3439 - 139,233}{0,9} = 3677,53 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Можно оценить, как эксергия топлива используется в отдельных элементах установки.

Для котельного агрегата эксергетический КПД составляет  $\eta_{\text{ехка}} = 0,4269$  (см. пример к задаче 1).

Потери эксергии в проточной части турбины:

$$d_{\text{епт}} = T_{oc}(S_2 - S_{2s}) = 288 \cdot (7,619 - 6,691) = 267,264 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Эксергетический КПД турбины:

$$\eta_{\text{ехпт}} = 1 - \frac{d_{\text{епт}}}{e_1 - e_2} = 1 - \frac{267,264}{1504,388 - 104,317} = 0,809$$

Теплота, отводимая в конденсаторе:

$$q_2 = h_2 - h'_2 = 2297,193 - 121,53 = 2175,663 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Потери эксергии теплоты, отводимой в конденсаторе:

$$d_{\text{ек}} = e_2 - e'_2 = 104,317 - 1,1604 = 103,156 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Работа, затрачиваемая на повышение давления конденсата (воды) в питательном насосе:

$$W_{\text{пн}} = h_3 - h'_2 = 139,233 - 121,53 = 17,693 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Увеличение эксергии конденсата (воды) при повышении давления в питательном насосе:

$$\Delta e_{\text{пн}} = e_3 - e'_2 = 15,916 - 1,1604 = 14,7556 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Потери эксергии в питательном насосе:

$$d_{\text{епн}} = T_{\text{ос}}(S_3 - S'_2) = 288 \cdot (0,433 - 0,4228) = 2,937 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Эксергетический КПД питательного насоса:

$$\eta_{\text{ехпн}} = \frac{\Delta e_{\text{пн}}}{W_{\text{пн}}} = \frac{14,7556}{17,693} = 0,834$$

Эксергетический КПД паротурбинной установки:

$$\eta_{\text{ехпту}} = \frac{W_{\text{пт}} - W_{\text{пн}}}{e_{\text{тл}}} = \frac{[(h_1 - h_2) - (h_3 - h'_2)]}{e_{\text{тл}}};$$

$$\eta_{\text{ехпту}} = \frac{[(3430 - 2297,193) - 17,693]}{3677,53} = 0,303.$$

Численно он совпадает с ранее рассчитанным внутренним КПД паротурбинной установки. Результаты эксергетического анализа позволяют оценить влияние процессов, происходящих в отдельных элементах установки, на её общую эффективность.

В этом случае целесообразно потери эксергии представить в относительном виде:

– потери эксергии в котельном агрегате:

$$\bar{d}_{\text{ека}} = (1 - \eta_{\text{ехка}}) \cdot 100\% = (1 - 0,4269) \cdot 100\% = 57,31\%.$$

– потери эксергии в паровой турбине:

$$\bar{d}_{\text{епт}} = \frac{d_{\text{епт}} \cdot 100\%}{e_{\text{тл}}} = \frac{267,264 \cdot 100\%}{3677,53} = 7,267\%.$$

– потери эксергии в конденсаторе:

$$\bar{d}_{\text{ек}} = \frac{d_{\text{ек}} \cdot 100\%}{e_{\text{тл}}} = \frac{103,156 \cdot 100\%}{3677,53} = 2,805\%.$$

– потери эксергии в питательном насосе:

$$\bar{d}_{\text{епн}} = \frac{d_{\text{епн}} \cdot 100\%}{e_{\text{тл}}} = \frac{2,937 \cdot 100\%}{3677,53} = 0,08\%.$$

Полученные результаты показывают, что наибольшие потери происходят в котельном агрегате, и свидетельствуют о целесообразности снижения этих потерь как путем совершенствования котельного агрегата, так и термодинамического цикла работы теплоэнергетической установки, например, путём организации промежуточного перегрева пара, регенеративного подогрева питательной воды (конденсата), газотурбинных надстроек и т.д.

Исходные данные для решения задачи 3 необходимо выбрать из таблиц 1 и 2.

Заданы: котельный агрегат, отпускающий водяной пар под давлением –  $P_{\text{п}}$ , при температуре –  $t_{\text{п}}$ , работающий на топливе с теплотой сгорания –  $Q_{\text{н}}^{\text{Р}}$ , КПД котельного агрегата –  $\eta_{\text{ка}}$ , температура окружающей среды –  $t_{\text{ос}}$  и давление окружающей среды –  $P_{\text{ос}}$  (принимаются из условия и решения задач 1, 2). Давление пара на входе в турбину –  $P_1$  и температура пара на входе в турбину –  $t_1$ , принимаются равными давлению и температуре пара, отпускаемого котельным агрегатом (снижением давления и температуры пара в паропроводе между котлом и турбиной в данном расчёте пренебрегаем). Давление пара в конденсаторе –  $P_{\text{к}}$ , внутренний относительный КПД турбины –  $\eta_{\text{oi}}^{\text{пт}}$ , питательного насоса –  $\eta_{\text{oi}}^{\text{пн}}$ , механический КПД –  $\eta_{\text{м}}$  принимаются из таблицы 2.

Определить эффективный КПД паротурбинной установки, потери эксергии и эксергетический КПД её отдельных элементов и всей установки в целом, оценить их влияние на общую энергетическую эффективность. Изобразить и описать схему и термодинамический цикл паросиловой установки.

Ответить на вопросы:

1. Как влияют энергетические характеристики источника теплоты (пара) на энергетическую эффективность паросиловой установки?
2. Как влияют параметры термодинамического цикла работы паросиловой установки на её энергетическую эффективность?
3. Как влияют показатели энергетических характеристик парового двигателя на энергетическую эффективность паросиловой установки?
4. Как проявляется влияние энергетической эффективности паросиловой установки на окружающую среду?

Таблица 2

**Исходные данные для решения задачи №3**

| Последняя<br>цифра шифра | $P_k$ , кПа | Предпоследняя<br>цифра шифра | $\eta_{oi}^{пт}$ | $\eta_{oi}^{пн}$ | $\eta_m$ |
|--------------------------|-------------|------------------------------|------------------|------------------|----------|
| 0                        | 3           | 0                            | 0,76             | 0,75             | 0,97     |
| 1                        | 6           | 1                            | 0,78             | 0,77             | 0,99     |
| 2                        | 4           | 2                            | 0,8              | 0,78             | 0,99     |
| 3                        | 7           | 3                            | 0,92             | 0,8              | 0,975    |
| 4                        | 5           | 4                            | 0,94             | 0,82             | 0,985    |
| 5                        | 5,4         | 5                            | 0,86             | 0,85             | 0,995    |
| 6                        | 3,5         | 6                            | 0,88             | 0,96             | 0,977    |
| 7                        | 6,4         | 7                            | 0,79             | 0,88             | 0,997    |
| 8                        | 4,5         | 8                            | 0,83             | 0,79             | 0,992    |
| 9                        | 7,5         | 9                            | 0,87             | 0,89             | 0,998    |



#### Задача 4

##### Эксергетический анализ теплообменного аппарата

Термодинамический анализ теплообменного аппарата, основанный на эксергетическом балансе, позволяет получить количественную характеристику степени термодинамического совершенства его работы. Для технологических аппаратов, не производящих механическую работу, эксергетический КПД может быть определён по следующим зависимостям:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{E''}{E'},$$

где  $E''$  – поток эксергии на выходе из аппарата, Вт,

$E'$  – поток эксергии на входе в аппарат, Вт.

$$E'' = E' - D_e$$

где  $D_e$  – сумма потерь эксергии от конечной разности температур, от гидравлических сопротивлений и через тепловую изоляцию в окружающую среду, Вт.

Тогда эксергетический КПД теплообменного аппарата может быть также определён по зависимости:

$$\eta_{\text{ex}} = 1 - \frac{D_e}{E'}$$

В качестве примера можно рассмотреть эксергетический анализ четырёхходового кожухотрубного теплообменного аппарата [6], в котором горячей водой осуществляется нагрев  $G_{\text{вз}} = 400$  кг/ч воздуха от начальной температуры  $t'_{\text{вз}} = 20^\circ\text{C}$  до конечной температуры  $t''_{\text{вз}} = 50^\circ\text{C}$ . При этом горячая вода охлаждается от начальной температуры  $t'_{\text{вд}} = 65^\circ\text{C}$  до конечной температуры  $t''_{\text{вд}} = 55^\circ\text{C}$ . Давление воздуха составляет на входе в аппарат  $P'_{\text{вз}} = 1,09 \cdot 10^5$  Па, на выходе из аппарата  $P''_{\text{вз}} = 1,01 \cdot 10^5$  Па. Потери теплоты через тепловую изоляцию составляют по воде  $q_{\text{вд}}^{\text{пот}} = 0,05$ , по воздуху  $q_{\text{вз}}^{\text{пот}} = 0,025$  от полезно используемой теплоты. Температура окружающей среды  $t_{\text{oc}} = 10^\circ\text{C}$ , давление окружающей среды  $P_{\text{oc}} = 1 \cdot 10^5$  Па. Вода движется внутри труб, а воздух – в межтрубном пространстве. Общее количество труб  $n = 80$ , трубы стальные цельнотянутые  $d = 10 \times 1$  мм, длины труб  $l = 3$  м, число ходов в трубном пространстве  $n_x = 4$ ,

штуцеры для воды имеют диаметр  $d_{шт} = 36 \times 2$  мм. Определить эксергетический КПД теплообменного аппарата.

На рис. 6 представлена схема потоков в четырёхходовом кожухотрубном теплообменном аппарате.

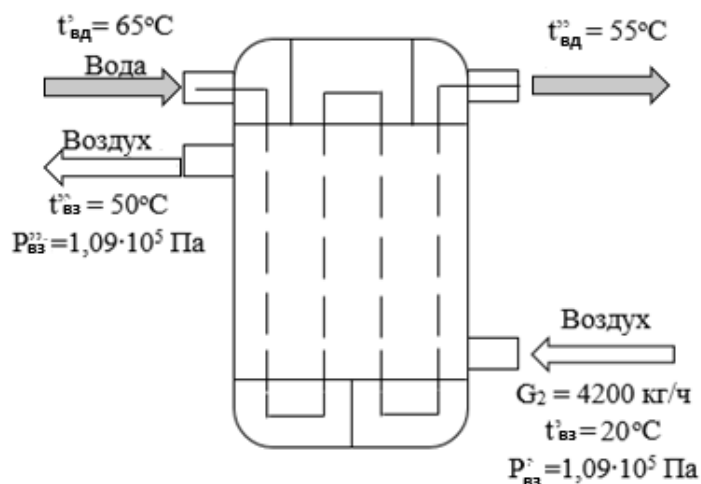


Рисунок 6. Схема потоков в четырёхходовом теплообменном аппарате

### Решение задачи

#### Средние температуры и теплоёмкости энергоносителей

Средняя температура нагреваемого воздуха:

$$t_{вз} = 0,5 \cdot (t'_{вз} + t''_{вз}) = 0,5 \cdot (20 + 50) = 35^\circ\text{C}$$

При этой температуре изобарная теплоемкость воздуха  $Cr_{вз} = 1004$  Дж/(кг·К) (см. прил. табл. 7).

Средняя разность температур при противоточном движении воды и воздуха:

$$t'_{вд} = 65^\circ\text{C} \rightarrow t''_{вд} = 55^\circ\text{C}$$

$$t''_{вз} = 50^\circ\text{C} \leftarrow t'_{вз} = 20^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = 15^\circ\text{C}, \Delta t_6 = 35^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} = \frac{35}{15} > 2$$

$$\text{тогда } \Delta t_{\text{ср}}^{\text{прот}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{35 - 15}{\ln \frac{35}{15}} = 23,5^{\circ}\text{C}.$$

Средняя разность температур для смешанного тока воды и воздуха [12]:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \Delta t_{\text{ср}}^{\text{прот}} \cdot \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – поправочный коэффициент.

Определяем коэффициенты:

$$P = \frac{t''_{\text{вз}} - t'_{\text{вз}}}{t'_{\text{вд}} - t'_{\text{вз}}} = \frac{50 - 20}{65 - 20} = 0,66,$$

$$R = \frac{t''_{\text{вд}} - t'_{\text{вд}}}{t''_{\text{вз}} - t'_{\text{вз}}} = \frac{65 - 50}{50 - 20} = 0,5.$$

По численным значениям  $P$  и  $R$  (см. прил. рис. 1). Определяем значение поправочного коэффициента  $\varepsilon = 0,9$ .

$$\Delta t_{\text{ср}} = 23,5 \cdot 0,9 = 21,15^{\circ}\text{C}.$$

Средняя температура воды:

$$t_{\text{вд}} = t_{\text{вз}} + \Delta t_{\text{ср}} = 35 + 21,15 = 56,15^{\circ}\text{C}.$$

При этой температуре теплоемкость воды  $Cp_{\text{вд}} = 4399,5$  Дж/(кг·К).

### Расход горячей воды

$$\begin{aligned} G_{\text{вд}} &= \frac{G_{\text{вз}} \cdot C_{\text{вз}} \cdot (t''_{\text{вз}} - t'_{\text{вз}}) \cdot (1 + q_{\text{вз}}^{\text{пот}})}{C_{\text{вд}} \cdot (t''_{\text{вд}} - t'_{\text{вд}}) \cdot (1 + q_{\text{вд}}^{\text{пот}})} = \\ &= \frac{4200 \cdot 1004 \cdot (50 - 20) \cdot (1 + 0,025)}{3600 \cdot 4399 \cdot (65 - 55) \cdot (1 - 0,05)} = \\ &= 0,882 \text{ кг/с}, \end{aligned}$$

где  $q_{\text{вд}}^{\text{пот}}$ ,  $q_{\text{вз}}^{\text{пот}}$  – потери теплоты в теплообменнике со стороны воды и воздуха соответственно.

### Потери давления по воде

Для трубного пространства кожухотрубных теплообменников [6, 12]

$$\Delta P_{\text{вд}} = \left( \frac{\lambda_{\text{тр}} \cdot l \cdot n_x}{d} + \sum \xi_{\text{мс } i} \right) \cdot \omega_{\text{вд}}^2 \cdot \frac{\rho_{\text{вд}}}{2}, \text{ Па},$$

где  $l$  – длина труб теплообменника, м;

$n_x$  – число ходов по трубному пространству;

$\omega_{вд}$  – скорость потока воды внутри труб, м/с;

$\rho_{вд}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda_{тр}$  – коэффициент трения;

$\sum \xi_{мс\ i}$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений.

Значение критерия Рейнольдса:

$$Re_{вд} = \omega_{вд} \cdot d_{вн} \cdot \frac{\rho_{вд}}{\mu_{вд}},$$

где  $\omega_{вд}$  – средняя скорость воды в аппарат, м\с:

$$\omega_{вд} = \frac{G_{вд}}{\rho_{вд} \cdot f_{вд}},$$

где  $f_{вд}$  – площадь «живого» сечения для прохода воды:

$$f_{вд} = n \cdot 0,785 \cdot \frac{d_{вн}^2}{n_x} = 80 \cdot 0,785 \cdot \frac{(8 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 0,001 \text{ м}^2,$$

$$\omega_{вд} = \frac{0,882}{983 \cdot 0,001} = 0,897 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

где  $\mu_{вд}$  – коэффициент динамической вязкости воды, Па·с [12];

$d_{вн}$  – внутренний диаметр трубок, мм;

$$d_{вн} = d_n - 2\delta = 10 - 2 \cdot 1 = 8 \text{ мм},$$

$$Re_{вд} = 0,897 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{983}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 13840,6.$$

Для стальных цельнотянутых труб при незначительной коррозии определяем шероховатость стенки труб  $e = 0,2$  мм [6, 12], тогда:

$$\frac{20 \cdot d_{вн}}{e} = \frac{20 \cdot 8}{0,2} = 800,$$

$$\frac{500 \cdot d_{вн}}{e} = \frac{500 \cdot 8}{0,2} = 20000,$$

$$\frac{500 \cdot d_{вн}}{e} > Re_{вд} > 20, \text{ то режим течения воды турбулентный.}$$

Коэффициент трения [6, 12]:

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{Re_{\text{вд}}} + \frac{e}{d_{\text{вн}}} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{13840,6} + \frac{0,2}{8} \right)^{0,25} = 0,46,$$

$\xi_{\text{вх}} = \xi_{\text{вых}} = 1$  – коэффициент местного сопротивления входа в трубу и выхода из трубы;

$n_{\text{вх}} = 4$  и  $n_{\text{вых}} = 4$  – количество входов и выходов из трубы;

$\xi_{\text{пов}} = 2,5$  – коэффициент местного сопротивления поворота на  $180^\circ$  при переходе потока труб из одной секции в другую;

$n_{\text{пов}} = 3$  – количество поворотов на  $180^\circ$ .

$$\sum \xi_{\text{мс } i} = 1 \cdot (4 + 4) + 2,5 \cdot 3 = 15,5$$

Потери давления воды внутри теплообменника:

$$\Delta P_{\text{вд}} = \left( \frac{0,046 \cdot 3 \cdot 4}{0,008} + 15,5 \right) \cdot 0,897^2 \cdot \frac{983}{2} = 33416,82 \text{ Па}$$

Скорость воды во входном и выходном штуцерах:

$$\omega_{\text{вд}}^{\text{шт}} = \frac{\omega_{\text{вд}} \cdot n \cdot d_{\text{вн}}^2}{n_{\text{х}} \cdot d_{\text{шт}}^2} = \frac{0,897 \cdot 80 \cdot 0,008^2}{4 \cdot 0,034^2} = 0,993 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\omega_{\text{вд}}^{\text{шт}} > \omega_{\text{вд}}$$

Коэффициент местного сопротивления входной и выходной камер теплообменника [6, 12]:

$$\xi_{\text{вх}} = \xi_{\text{вых}} = 1,5$$

Потери давления воды во входной и выходной камерах теплообменника:

$$\Delta P_{\text{вд}}^{\text{кам}} = (\xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}}) \cdot (\omega_{\text{вд}}^{\text{шт}})^2 \cdot \frac{\rho_{\text{вд}}}{2} = 1453,929 \text{ Па}$$

Общие потери давления в теплообменнике со стороны воды:

$$\sum \Delta P_{\text{вд}} = \Delta P_{\text{вд}} + \Delta P_{\text{вд}}^{\text{кам}} = 33416,82 + 1453,929 = 34870,749 \text{ Па}$$

Средняя термодинамическая температура воды на входе и выходе из теплообменника [6]:

$$\bar{T}_{вд} = \frac{(T'_{вд} - T''_{вд})}{\ln \frac{T'_{вд}}{T''_{вд}}} = \frac{323 - 329}{\ln \frac{338}{329}} = 332,97 \text{ K}$$

Средняя термодинамическая температура воздуха на входе и выходе из теплообменника [6]:

$$\bar{T}_{вз} = \frac{(T''_{вз} - T'_{вз})}{\ln \frac{T''_{вз}}{T'_{вз}}} = \frac{323 - 293}{\ln \frac{323}{293}} = 307,75 \text{ K}$$

Поток потерь эксергии от конечной разности температур при теплообмене с изменением температур вдоль теплообменной поверхности [6]:

$$D_{e\Delta T} = \frac{T_{oc} \cdot \dot{Q} \cdot (\bar{T}_{вд} - \bar{T}_{вз})}{\bar{T}_{вд} \cdot \bar{T}_{вз}} = T_{oc} \cdot \dot{Q} \cdot (\bar{T}_{вд}^{-1} - \bar{T}_{вз}^{-1}), \text{ Вт},$$

где  $\dot{Q}$  – тепловой поток с учетом потерь теплоты, Вт,

$$\dot{Q} = G_{вз} \cdot C_{вз} \cdot (t''_{вз} - t'_{вз}) \cdot (1 + q_{вз}^{пот}) = 4200 \cdot 1004 \cdot (50 - 20) \cdot \frac{1 + 0,025}{3600} = 36018,5 \text{ Вт}$$

$$D_{e\Delta T} = 283 \cdot 36018,5 \cdot (307,75^{-1} - 332,97^{-1}) = 2508,73 \text{ Вт}$$

Поток потерь эксергии от гидравлических сопротивлений со стороны воздуха и воды:

$$D_{e\Delta P} = D_{e\Delta P_{вз}} + D_{e\Delta P_{вд}}, \text{ Вт},$$

где  $D_{e\Delta P_{вз}}$  – поток потерь эксергии от аэродинамических сопротивлений со стороны воздуха, Вт, [6],

$$D_{e\Delta P_{вз}} = T_{oc} \cdot G_{вз} \cdot \Delta S_{\Delta P_{вз}} = T_{oc} \cdot G_{вз} \cdot R_{вз} \cdot \ln \frac{P'_{вз}}{P''_{вз}},$$

где  $R_{вз} = \frac{R_0}{M} = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  – характеристическая газовая постоянная воздуха,

$$D_{e\Delta P_{вз}} = \frac{283 \cdot 4200 \cdot 287 \cdot \ln \frac{1,09}{1,0}}{3600} = 8166,011 \text{ Вт},$$

$D_{e\Delta P_{вд}}$  – поток потерь эксергии от гидравлических сопротивлений со стороны воды, Вт, [6]:

$$D_{e\Delta P_{вд}} = T_{oc} \cdot G_{вд} \cdot \Delta S_{\Delta P_{вд}} = T_{oc} \cdot G_{вд} \cdot \beta_{вд} \cdot \frac{P'_{вд} - P''_{вд}}{\rho_{вд}}, \text{ Вт},$$

где  $\beta_{вд} = 0,45 \cdot 10^{-3}$  – коэффициент объемного (термического) расширения воды [12],

$$D_{e\Delta P_{вд}} = \frac{283 \cdot 0,882 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot 33549,55}{983} = 3,833 \text{ Вт},$$

$$D_{e\Delta P} = 8166,011 + 3,833 = 8169,844 \text{ Вт}.$$

Поток полезно используемой теплоты:

$$\dot{Q}_{пол} = G_{вз} \cdot C_{вз} \cdot (t''_{вз} - t'_{вз}) = \frac{4200 \cdot 1004 \cdot (50 - 20)}{3600} = 35140 \text{ Вт}.$$

Потери потока эксергии теплоты воды через тепловую изоляцию:

$$D_{евд}^{из} = q_{вд}^{пот} \cdot \dot{Q}_{пол} \cdot \left(1 - \frac{T_{oc}}{\bar{T}_{вд}}\right) = 0,05 \cdot 35140 \cdot \left(1 - \frac{283}{332,97}\right) = 263,679 \text{ Вт}.$$

Потери потока эксергии теплоты воздуха через тепловую изоляцию:

$$D_{евз}^{из} = q_{вз}^{пот} \cdot \dot{Q}_{пол} \cdot \left(1 - \frac{T_{oc}}{\bar{T}_{вз}}\right) = 0,025 \cdot 35140 \cdot \left(1 - \frac{283}{307,75}\right) = 70,651 \text{ Вт}.$$

Суммарные потери потока эксергии теплоты через тепловую изоляцию:

$$D_{еиз} = D_{евд}^{из} + D_{евз}^{из} = 263,679 + 70,651 = 334,33 \text{ Вт}.$$

Удельная эксергия потока воды на входе в теплообменник [2, 6]:

$$\begin{aligned} e'_{вд} &= C_{P_{вд}} \cdot (T'_{вд} - T_{oc}) - T_{oc} \cdot \left[ C_{P_{вд}} \cdot \ln \frac{T'_{вд}}{T_{oc}} - \beta_{вд} \cdot \frac{\Delta P_{вд}}{\rho_{вд}} \right] = \\ &= 4399,5 \cdot (338 - 283) - 283 \cdot \left[ 4399,5 \cdot \ln \frac{338}{283} - 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{34870}{983} \right] = \\ &= 20855,876 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \end{aligned}$$

Удельная эксергия потока теплоты воздуха на входе в теплообменник [6]:

$$e'_{вз} = C_{P_{вз}} \cdot (T'_{вз} - T_{oc}) - T_{oc} \cdot \left[ C_{P_{вз}} \cdot \ln \frac{T'_{вз}}{T_{oc}} - R_{вз} \cdot \ln \frac{\Delta P_{вз}}{P_{oc}} \right] =$$

$$= 1004 \cdot (293 - 283) - 283 \cdot \left[ 1004 \cdot \ln \frac{293}{283} - 287 \cdot \ln \frac{1,09}{1,0} \right] =$$

$$= 7172,757 \text{ Дж/кг.}$$

Суммарный поток эксергии на входе в теплообменный аппарат:

$$E_{\text{вх}} = G_{\text{вд}} \cdot e'_{\text{вд}} + G_{\text{вз}} \cdot e'_{\text{вз}} = \frac{0,882 \cdot 20855,876 + 4200 \cdot 7172,757}{3600} =$$

$$= 26763,099 \text{ Вт.}$$

Эксергетический КПД теплообменного аппарата:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{\text{вых}}}{E_{\text{вх}}} = 1 - \frac{\sum D}{E_{\text{вх}}} = 1 - \frac{D_{e\Delta T} + D_{e\Delta P} + D_{e\text{из}}}{E_{\text{вх}}} =$$

$$= 1 - \frac{2508,73 + 8169,844 + 334,33}{26763,099} = 0,588$$

Удельные эксергии потоков теплоты воды и воздуха на выходе из теплообменного аппарата. При расчете эксергии в этом случае давление воды и воздуха (на выходе из аппарата) равно  $P_{oc}$ , т.е.  $P'_{\text{вз}} = P''_{\text{вз}} = P_{oc}$ .

Удельная эксергия потока теплоты воды на выходе из теплообменного аппарата [6]:

$$e''_{\text{вд}} = C_{P\text{вд}} \cdot (T''_{\text{вд}} - T_{oc}) - T_{oc} \cdot \left[ C_{P\text{вд}} \cdot \ln \frac{T''_{\text{вд}}}{T_{oc}} \right] =$$

$$= 4399,5 \cdot (328 - 283) - 283 \cdot \left[ 4399,5 \cdot \ln \frac{328}{283} \right] = 14248,312 \text{ Дж/кг.}$$

Удельная эксергия потока теплоты воздуха на выходе из теплообменного аппарата [6]:

$$e''_{\text{вз}} = C_{P\text{вз}} \cdot (T''_{\text{вз}} - T_{oc}) - T_{oc} \cdot \left[ C_{P\text{вз}} \cdot \ln \frac{T''_{\text{вз}}}{T_{oc}} \right] =$$

$$= 1004 \cdot (323 - 283) - 283 \cdot \left[ 1004 \cdot \ln \frac{323}{283} \right] = 2596,2 \text{ Дж/кг.}$$

Суммарный поток эксергии теплоты на выходе из теплообменного аппарата:

$$E_{\text{вых}} = G_{\text{вд}} \cdot e''_{\text{вд}} + G_{\text{вз}} \cdot e''_{\text{вз}} = \frac{0,882 \cdot 14248,312 + 4200 \cdot 2596,2}{3600} =$$

$$= 15595,911 \text{ Вт.}$$

Эксергетический КПД теплообменного аппарата:



$$\eta_{ex} = \frac{E_{вых}}{E_{вх}} = \frac{15595,911}{26763,099} = 0,582$$

Расхождение при расчетах по двум методам составляет 0,5-0,6%, которое является допустимым и может объясняться округлением при расчетах.

Исходные данные для решения задачи 4 выбрать из таблицы 3.

Задан четырёхходовой теплообменный аппарат, в котором осуществляется подогрев  $G_{вз}$ , кг/ч воздуха от начальной температуры  $t'_{вз}$ , °С до конечной температуры  $t''_{вз}$ , °С горячей водой с начальной температурой  $t'_{вд}$ , °С и конечной температурой  $t''_{вд}$ , °С. Давление воздуха на входе в теплообменник  $P'_{вз}$ , Па, на выходе из теплообменника –  $P''_{вз}$ , Па. Потери теплоты через тепловую изоляцию составляют по воде -  $q_{вд}^{пот}$ , %, по воздуху -  $q_{вз}^{пот}$ , % от затраченной теплоты. Температура окружающей среды  $t_{oc}$ , °С, давление окружающей среды  $P_{oc}$ , Па. Вода движется внутри труб теплообменного аппарата, а воздух – в межтрубном пространстве. Теплообменный аппарат выполнен из стальных цельнотянутых труб наружным диаметром  $d$ , мм, толщиной  $\delta = 1$  мм, общее число труб  $n$ , длины труб  $l = 4$  м, число ходов в трубном пространстве  $n_x = 4$ , штуцеры для воды имеют диаметр  $d_{шт} = 36 \times 2$  мм.

Определить эксергетический КПД теплообменного аппарата. Привести схемы и краткое описание конструктивных решений типовых теплообменных аппаратов для утилизации теплоты. Ответить на вопросы:

1. Сущность эксергетического метода анализа.
2. Как повысить эксергетическую эффективность теплообменного аппарата?
3. Какие характеристики процесса влияют на термодинамическое совершенство теплообменного аппарата?

Таблица 3

## Исходные данные для решения задачи №4

| Последняя<br>цифра<br>шифра | $G_{вз},$<br>кг/ч<br>$\cdot 10^{-2}$ | $t'_{вз},$<br>°C | $t''_{вз},$<br>°C | $t'_{вд},$<br>°C | $t''_{вд},$<br>°C | $n$ | $d,$<br>мм | Предпоследняя<br>цифра шифра | $q_{вд}^{пот},$<br>% | $q_{вз}^{пот},$<br>% | $P'_{вз},$<br>Па | $t_{ос},$<br>°C |
|-----------------------------|--------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|-----|------------|------------------------------|----------------------|----------------------|------------------|-----------------|
| 0                           | 42                                   | 15               | 45                | 75               | 65                | 80  | 10         | 0                            | 5                    | 2,0                  | 1,09             | 10              |
| 1                           | 40                                   | 20               | 50                | 70               | 60                | 76  | 12         | 1                            | 4                    | 2,5                  | 1,085            | 15              |
| 2                           | 38                                   | 25               | 55                | 65               | 55                | 74  | 14         | 2                            | 3                    | 3,0                  | 1,08             | 20              |
| 3                           | 36                                   | 15               | 45                | 70               | 60                | 72  | 10         | 3                            | 4                    | 3,5                  | 1,075            | 10              |
| 4                           | 34                                   | 20               | 50                | 65               | 55                | 70  | 12         | 4                            | 5                    | 3,0                  | 1,07             | 15              |
| 5                           | 32                                   | 25               | 55                | 70               | 60                | 64  | 14         | 5                            | 4                    | 2,5                  | 1,065            | 20              |
| 6                           | 30                                   | 15               | 45                | 65               | 55                | 60  | 10         | 6                            | 3                    | 2,0                  | 1,06             | 10              |
| 7                           | 28                                   | 20               | 50                | 65               | 55                | 56  | 12         | 7                            | 4                    | 2,5                  | 1,055            | 15              |
| 8                           | 26                                   | 25               | 55                | 75               | 65                | 50  | 14         | 8                            | 5                    | 3,0                  | 1,05             | 20              |
| 9                           | 24                                   | 15               | 45                | 70               | 50                | 48  | 12         | 9                            | 4                    | 2,5                  | 1,06             | 10              |

$$P_{oc} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$$

$$\delta = 1 \text{ мм}$$

$$n_x = 4$$

$$P''_{вз} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

### Список рекомендуемой литературы

- 1) Теплотехника: под общ. ред. Архарова А.М., Афанасьева В.Н. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 792 с.
- 2) Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии: учебное пособие/О.А. Тишин, В.Н. Харитонов, Н.Ц. Гатапова, А.И. Колиух. – Тамбов: Изд.-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 92 с.
- 3) Калекин В.С. Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии – 2-е изд. перераб. и доп., Омск: изд. ОМГТУ, 2006. – 92 с.
- 4) Александров А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок: Учебное пособие/Электронный ресурс/: учеб. пособие – Электрон. дан. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. – 159с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/72304>. – Загл. С экрана.
- 5) Сажин Б.С., Булеков А.П., Сажин В.П. Эксергетический анализ работы промышленных установок. М. 2000. 297 с., ил.
- 6) Кручинин М.И., Шадрина Е.М. Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения. Эксергетический анализ теплообменных аппаратов: учебное пособие / ГОУ ВПО Иван. Гос. Хим.-технол. Ун-т. Иваново, 2007. 44 с.
- 7) Паровые и газовые турбины для электростанций / Электронный ресурс/: учеб. / Костюк А.Г. [ и др.]. – Электрон. дан. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. – 557с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/72260>. – Загл. с экрана.
- 8) Лебедев В.М. Источники и системы теплоснабжения предприятий / Электронный ресурс/: учеб. / В.М. Лебедев, С.В. Приходько. – Электрон. дан. – Москва: УМЦ ЖДТ, 2013. – 354 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/60009>. – Загл. с экрана.
- 9) Кисс В.В., Казаков А.В., Рахманов Ю.А. Расчёт паровой системы теплоснабжения пищевого предприятия. – Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХ и БТ, 2014. – 68 с.
- 10) Рахманов Ю.А. Энергетические установки и экология энергосистем: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 51с.
- 11) Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. Рек. Гос. Службой стандартных справочных данных – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984, 80 с. с ил.
- 12) Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и

- задачи): Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с., ил.
- 13) Панкратов Г.П. Сборник задач по теплотехнике: Учебное пособие для неэнергетических специальностей вузов. – 2-е издание. – М.: Высш. шк., 1986. – 286 с.
- 14) Г.Д. Бэр Техническая термодинамика. Теоретические основы и технические приложения. Перевод с нем. д.т.н. Э.А. Ашратова и к.т.н. О.А. Кардасевича, под ред. проф. В.М. Бродянского и проф. Г.Н. Костенко. Изд. «МИР», Москва, 1977, 518 с.

### **Ресурсы ИНТЕРНЕТ**

- 1) Универсальная информационная система «Россия»:  
[www.cir.ru](http://www.cir.ru)
- 2) Научная электронная библиотека:  
[www.clibrary.ru](http://www.clibrary.ru)
- 3) Электронная библиотека образовательных и просветительских изданий:  
[www.iglib.ru](http://www.iglib.ru)

## Приложения

### СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Таблица 1

#### Средний состав и теплота сгорания некоторых видов газообразного топлива

| Газопровод                              | Состав газа, % по объему |                               |                               |                                |                                |                 |                | $Q_H^p$            |
|-----------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------|--------------------|
|                                         | CH <sub>4</sub>          | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | МДж/м <sup>3</sup> |
| Брянск-Москва                           | 92,8                     | 3,9                           | 1,1                           | 0,4                            | 0,1                            | 1,6             | 0,1            | 37,31              |
| Оренбург-Совхозное                      | 91,4                     | 4,1                           | 1,9                           | 0,6                            | -                              | 0,2             | 0,7            | 38,02              |
| Ставрополь-Грозный                      | 98,2                     | 0,4                           | 0,1                           | 0,1                            | 0                              | 1,0             | 0,2            | 35,63              |
| Газ биологический животноводческих ферм | 66,0                     | -                             | -                             | -                              | -                              | 30,8            | 3,2            | 23,61              |

Таблица 2

#### Потеря теплоты от наружного охлаждения котельного агрегата в зависимости от паропроизводительности

|                                           |   |     |   |     |      |     |     |
|-------------------------------------------|---|-----|---|-----|------|-----|-----|
| Паропроизводительность, т/ч               | 1 | 2   | 4 | 6,5 | 10   | 20  | 35  |
| Потери теплоты от наружного охлаждения, % | 4 | 3,6 | 3 | 2,2 | 1,65 | 1,3 | 1,1 |

Таблица 3

**Типы топок, рекомендуемые для котельных агрегатов**

| <b>Виды топлива</b>                                                          | <b>Паропроизводительность,<br/>т/ч</b> | <b>Рекомендуется</b>                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Твердое топливо                                                              | 2,5                                    | Топка с простой колосниковой решеткой (РПК)                                             |
| Каменный бурый уголь (исключая бурый уголь повышенной влажности 35%)         | 6,5-10                                 | Полумеханические топki с забрасывателем и неподвижной решеткой (ПМЗ-РПК)                |
| Бурые угли (включая угли повышенной влажности) и неспекающиеся каменные угли |                                        | Топка с шурующей планкой (ТШП)                                                          |
| Каменные и бурые угли                                                        | 6,5-20                                 | Механические топki с забрасывателем и цепной решеткой обратного хода (ПМЗ-ЛЦР, ПМЗ-ЧЦР) |
|                                                                              | 10-35                                  | Механические топki с цепными чешуйчатыми решетками (ЧЦР)                                |
| Газ и мазут                                                                  | При всех значениях                     | Камерная топка                                                                          |

Таблица 4

## Расчетные характеристики слоевых топок для сжигания твердого топлива

| Наименование характеристик                                                                         | Обозначения | Топки с РПК |               |                 | Топки ПМЗ-РПК |          |           | Топки ТПШ |          | Топки ПМЗ-ЛЦР-ЧЦР        |           | Топки ЧЦР            |                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|---------------|-----------------|---------------|----------|-----------|-----------|----------|--------------------------|-----------|----------------------|----------------|-----------|
|                                                                                                    |             | Бурые угли  | Антрациты     |                 | Угли          |          |           |           |          |                          |           |                      |                |           |
|                                                                                                    |             |             | Сортированные | Несортированные | Бурые         | Каменные | Антрациты | Бурые     | Каменные | Бурые типа подмосковного | Каменные  | Каменные неспекающие | Слабоспекающие | Антрациты |
| Тепловое напряжение: зеркала горения, кВт/м <sup>2</sup> ;<br>топочного объема, кВт/м <sup>3</sup> | $q_R$       | 800         | 1160          | 870             | 930-1050      | 1050     | 930-1050  | 800-930   | 930-1050 | 1150-1280                | 1050-1600 | 1160                 | 1050           | 1160-800  |
|                                                                                                    | $q_V$       | 290         | 290           | 290             | 230-290       | 230-290  | 230-290   | 230-290   | 230-290  | 230-290                  | 230-290   | 230-290              | 230-290        | 230-290   |
| Значение коэффициента избытка воздуха                                                              | $\alpha$    | 1,45        | 1,4           | 1,45            | 1,4           | 1,4      | 1,6       | 1,4       | 1,4      | 1,3                      | 1,3       | 1,3                  | 1,3            | 1,6-1,5   |
| Потери теплоты: от химического недожога, %;<br>от механического недожога, %                        | $q_3$       | 3           | 2             | 2               | 1             | 1        | 0,5       | 1         | 1        | 0,5                      | 0,5       | 1                    | 1              | 0,5       |
|                                                                                                    | $q_4$       | 9           | 7             | 12              | 10            | 7        | 12-18     | 7-9       | 7        | 9                        | 6         | 6                    | 5              | 7-14      |
| Давление воздуха под решеткой, Па                                                                  | $p$         | 800         | 1000          | 1000            | 600           | 600      | 600       | 1000      | 1000     | 800                      | 800       | 800                  | 800            | 1000      |
| Температура дутьевого воздуха, °С                                                                  | $t$         | 25          | 25            | 25              | 25            | 25       | 25        | 25        | 25       | 150-250                  | 25-200    | 25-200               | 25-200         | 25-200    |

Таблица 5

**Расчетные характеристики некоторых видов твердого и жидкого топлива**

| Район месторождения                  | Бассейн,<br>месторождение | Марка | Элементарный состав рабочей массы, % |                |                           |                |                |                |                | $Q_{\text{н}}^{\text{P}}$ ,<br>МДж/кг | $V_{\text{л}}^{\text{P}}$ ,<br>% |
|--------------------------------------|---------------------------|-------|--------------------------------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------------------------|
|                                      |                           |       | $W^{\text{P}}$                       | $A^{\text{P}}$ | $S_{\text{л}}^{\text{P}}$ | $C^{\text{P}}$ | $H^{\text{P}}$ | $N^{\text{P}}$ | $O^{\text{P}}$ |                                       |                                  |
| Тульская обл.                        | Подмосковный              | Б2Р   | 32                                   | 25,20          | 1,2-1,5                   | 28,7           | 2,2            | 0,6            | 8,6            | 9,88                                  | 48                               |
| Пермская обл.<br>Урал                | Кизеловское               | Г     | 6                                    | 31,00          | 6,1                       | 48,5           | 3,6            | 0,8            | 4,0            | 19,59                                 | 44                               |
| Красноярский край<br>Канско-Ачинский | Назаровское               | Б2    | 39                                   | 7,30           | 0,4                       | 37,6           | 2,6            | 0,4            | 12,7           | 13,02                                 | 48                               |
| Иркутская обл.                       | Черемховское              | Д     | 12                                   | 27,00          | 1,1                       | 45,9           | 3,4            | 0,7            | 8,9            | 17,88                                 | 47                               |
| Республика Коми                      | Воркутинское              | Ж     | 7                                    | 23,60          | 0,8                       | 59,6           | 3,8            | 1,3            | 5,4            | 20,60                                 | 35,9                             |
| Мазут малосернистый                  |                           | 40    | 3                                    | 0,05           | 0,3                       | 84,65          | 11,7           | -              | 0,3            | 41,30                                 | -                                |



Таблица 6

**Расчетные характеристики камерных топок для сжигания природного газа и мазута**

| Вид топлива   | Тип топки        | Тип горелки  | Значение коэффициента избытка воздуха | Тепловое напряжение топочного объема<br>$q_v$ , кВт/м <sup>3</sup> | Потери теплоты от химического недожога, % |
|---------------|------------------|--------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Природный газ | Экранированная   | Подовая      | 1,1-1,15                              | 580                                                                | 1                                         |
|               |                  | Смесительная | 1,1-1,15                              | 350                                                                | 1,5                                       |
|               |                  | Эжекционная  | 1,1-1,15                              | 350                                                                | 1,5                                       |
|               | Неэкранированная | Подовая      | 1,25                                  | 460                                                                | 1                                         |
|               |                  | Смесительная | 1,2                                   | 290                                                                | 1,5                                       |
|               |                  | Эжекционная  | 1,2                                   | 290                                                                | 1,5                                       |
| Мазут         | Экранированная   | -            | 1,1                                   | 290-460                                                            | 2                                         |
|               | Неэкранированная | -            | 1,2                                   | 230-290                                                            | 1                                         |

Таблица 7

**Удельная изобарическая теплоемкость и энтальпия сухого воздуха  
и продуктов сгорания углеводородного топлива (85% углерода и 15%  
водорода)**

| $t, ^\circ\text{C}$                                               | $T, \text{K}$ | $c_p,$<br>кДж/(кг·К) | $\bar{c}_p,$<br>кДж/(кг·К) | $h,$<br>кДж/кг | $t, ^\circ\text{C}$                                                               | $T, \text{K}$ | $c_p,$<br>кДж/(кг·К) | $\bar{c}_p,$<br>кДж/(кг·К) | $h,$ кДж/кг |
|-------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|-------------|
| Сухой воздух:<br>$R = 0,28699$ кДж/кг·К<br>$\mu = 28,97$ кг/кмоль |               |                      |                            |                | Продукты сгорания:<br>$\alpha = 1, R = 0,2901$ кДж/кг·К<br>$\mu = 28,66$ кг/кмоль |               |                      |                            |             |
| 0                                                                 | 273           | 1,0028               | 1,0028                     | 0              | 0                                                                                 | 273           | 1,0660               | 1,0660                     | 0           |
| 25                                                                | 298           | 1,0038               | 1,0032                     | 25,08          | 25                                                                                | 298           | 1,0718               | 1,0680                     | 26,77       |
| 50                                                                | 323           | 1,0053               | 1,0038                     | 50,19          | 50                                                                                | 323           | 1,0776               | 1,0718                     | 53,59       |
| 100                                                               | 373           | 1,0098               | 1,0056                     | 100,56         | 100                                                                               | 373           | 1,0900               | 1,0778                     | 107,78      |
| 150                                                               | 423           | 1,0163               | 1,0080                     | 151,21         | 150                                                                               | 423           | 1,1031               | 1,0840                     | 162,60      |
| 200                                                               | 473           | 1,0244               | 1,0111                     | 202,22         | 200                                                                               | 473           | 1,1172               | 1,0905                     | 218,10      |
| 250                                                               | 523           | 1,0339               | 1,0147                     | 253,67         | 250                                                                               | 523           | 1,1320               | 1,0973                     | 274,33      |
| 300                                                               | 573           | 1,0445               | 1,0187                     | 305,61         | 300                                                                               | 573           | 1,1475               | 1,1044                     | 331,31      |
| 350                                                               | 623           | 1,0559               | 1,0232                     | 358,13         | 350                                                                               | 623           | 1,1634               | 1,1117                     | 389,08      |
| 400                                                               | 673           | 1,0677               | 1,0281                     | 411,22         | 400                                                                               | 673           | 1,1795               | 1,1191                     | 447,65      |
| 450                                                               | 723           | 1,0798               | 1,0331                     | 464,91         | 450                                                                               | 723           | 1,1956               | 1,1267                     | 507,03      |
| 500                                                               | 773           | 1,0918               | 1,0384                     | 519,20         | 500                                                                               | 773           | 1,2116               | 1,1344                     | 567,20      |
| 550                                                               | 823           | 1,1036               | 1,0438                     | 574,09         | 550                                                                               | 823           | 1,2272               | 1,1422                     | 628,19      |
| 600                                                               | 873           | 1,1150               | 1,0493                     | 629,58         | 600                                                                               | 873           | 1,2423               | 1,1499                     | 689,93      |
| 650                                                               | 923           | 1,1258               | 1,0547                     | 685,58         | 650                                                                               | 923           | 1,2568               | 1,1576                     | 752,41      |
| 700                                                               | 973           | 1,1361               | 1,0602                     | 742,13         | 700                                                                               | 973           | 1,2707               | 1,1651                     | 815,60      |
| 750                                                               | 1023          | 1,1457               | 1,0656                     | 799,17         | 750                                                                               | 1023          | 1,2839               | 1,1726                     | 879,47      |
| 800                                                               | 1073          | 1,1546               | 1,0709                     | 856,68         | 800                                                                               | 1073          | 1,2964               | 1,1800                     | 943,98      |
| 850                                                               | 1123          | 1,1629               | 1,0760                     | 914,62         | 850                                                                               | 1123          | 1,3083               | 1,1872                     | 1009,10     |
| 900                                                               | 1173          | 1,1707               | 1,0811                     | 972,97         | 900                                                                               | 1173          | 1,3195               | 1,1942                     | 1074,80     |
| 950                                                               | 1223          | 1,1779               | 1,0860                     | 1031,68        | 950                                                                               | 1223          | 1,3302               | 1,2011                     | 1141,04     |
| 1000                                                              | 1273          | 1,1846               | 1,0907                     | 1090,75        | 1000                                                                              | 1273          | 1,3403               | 1,2078                     | 1207,81     |
| 1050                                                              | 1323          | 1,1909               | 1,0954                     | 1150,14        | 1050                                                                              | 1323          | 1,3499               | 1,2143                     | 1275,02     |
| 1100                                                              | 1373          | 1,1969               | 1,0998                     | 1209,83        | 1100                                                                              | 1373          | 1,3590               | 1,2207                     | 1342,79     |
| 1150                                                              | 1423          | 1,2025               | 1,1042                     | 1269,82        | 1150                                                                              | 1423          | 1,3676               | 1,2269                     | 1410,96     |
| 1200                                                              | 1473          | 1,2079               | 1,1084                     | 1330,08        | 1200                                                                              | 1473          | 1,3758               | 1,2330                     | 1479,55     |
| 1250                                                              | 1523          | 1,2130               | 1,1125                     | 1390,60        | 1250                                                                              | 1523          | 1,3835               | 1,2388                     | 1548,53     |
| 1300                                                              | 1573          | 1,2178               | 1,1165                     | 1451,36        | 1300                                                                              | 1573          | 1,3908               | 1,2444                     | 1617,91     |
| 1350                                                              | 1623          | 1,2223               | 1,1204                     | 1512,36        | 1350                                                                              | 1623          | 1,3976               | 1,2498                     | 1687,69     |
| 1400                                                              | 1673          | 1,2265               | 1,1242                     | 1573,60        | 1400                                                                              | 1673          | 1,4040               | 1,2550                     | 1767,87     |

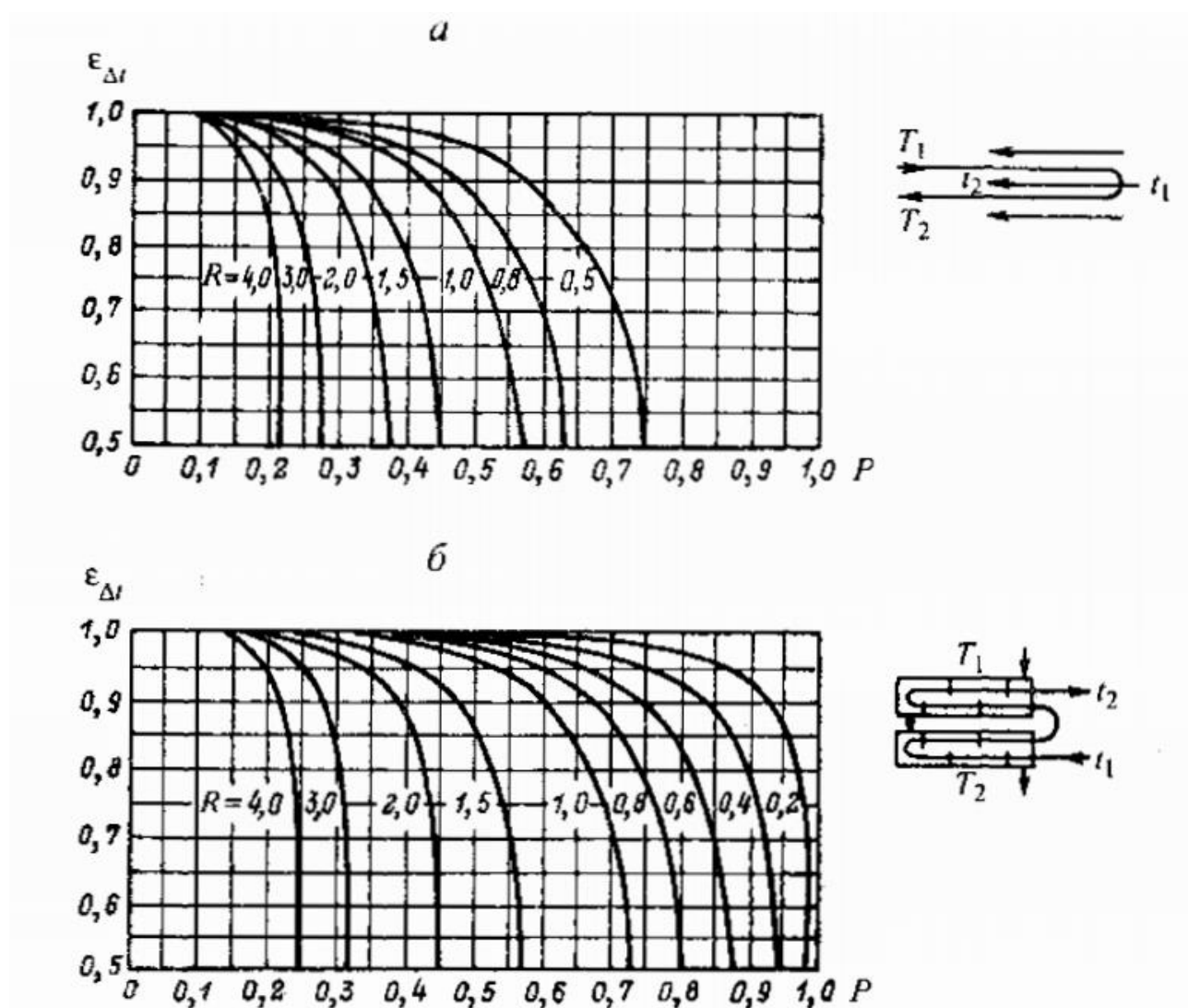
Таблица 8

**Удельные средние теплоемкости газов и воздуха при постоянном давлении**

| $t$ ,<br>°C | C <sub>CO2</sub> | C <sub>N2</sub> | C <sub>O2</sub> | C <sub>H2O</sub> | C <sub>CB</sub> | C <sub>B</sub> | $t$ ,<br>°C | C <sub>CO2</sub> | C <sub>N2</sub> | C <sub>O2</sub> | C <sub>H2O</sub> | C <sub>CB</sub> | C <sub>B</sub> |
|-------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|-------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|
|             | кДж/(м³·K)       |                 |                 |                  |                 |                |             | кДж/(м³·K)       |                 |                 |                  |                 |                |
| 0           | 1,6010           | 1,2955          | 1,3069          | 1,4954           | 1,2981          | 1,3198         | 1200        | 2,2655           | 1,4154          | 1,5017          | 1,7782           | 1,4338          | 1,4623         |
| 100         | 1,7016           | 1,2968          | 1,3186          | 1,5063           | 1,3014          | 1,3253         | 1300        | 2,2915           | 1,4263          | 1,5117          | 1,8042           | 1,4443          | 1,4736         |
| 200         | 1,7887           | 1,3006          | 1,3362          | 1,5235           | 1,3081          | 1,3328         | 1400        | 2,3154           | 1,4359          | 1,5214          | 1,8293           | 1,4539          | 1,4841         |
| 300         | 1,8641           | 1,3077          | 1,3571          | 1,5436           | 1,3182          | 1,3433         | 1500        | 2,3372           | 1,4451          | 1,5306          | 1,8541           | 1,4631          | 1,4937         |
| 400         | 1,9312           | 1,3173          | 1,3785          | 1,5666           | 1,3299          | 1,3555         | 1600        | 2,3573           | 1,4539          | 1,5390          | 1,8775           | 1,4719          | 1,5029         |
| 500         | 1,9902           | 1,3286          | 1,3990          | 1,5909           | 1,3437          | 1,3693         | 1700        | 2,3761           | 1,4623          | 1,5474          | 1,9010           | 1,4799          | 1,5113         |
| 600         | 2,0426           | 1,3412          | 1,4179          | 1,6161           | 1,3576          | 1,3840         | 1800        | 2,3933           | 1,4698          | 1,5553          | 1,9228           | 1,4879          | 1,5189         |
| 700         | 2,0900           | 1,3546          | 1,4355          | 1,6425           | 1,3718          | 1,3986         | 1900        | 2,4092           | 1,4770          | 1,5629          | 1,9437           | 1,4950          | 1,5268         |
| 800         | 2,1327           | 1,3680          | 1,4510          | 1,6693           | 1,3852          | 1,4124         | 2000        | 2,4239           | 1,4837          | 1,5704          | 1,9643           | 1,5021          | 1,5340         |
| 900         | 2,1708           | 1,3806          | 1,4657          | 1,6969           | 1,3986          | 1,4259         | 2100        | 2,4377           | 1,4904          | 1,5771          | 1,9840           | 1,5084          | 1,5411         |
| 1000        | 2,2052           | 1,3928          | 1,4786          | 1,7242           | 1,4108          | 1,4384         | 2200        | 2,4503           | 1,4962          | 1,5842          | 2,0024           | 1,5147          | 1,5474         |
| 1100        | 2,2366           | 1,4045          | 1,4904          | 1,7514           | 1,4225          | 1,4594         | 2300        | 2,4620           | 1,5021          | 1,5909          | 2,0204           | 1,5205          | 1,5536         |

Рисунок 1

**Поправочные коэффициенты  $\epsilon_{\Delta t}$  для смешанного тока в  
многоходовых кожухотрубчатых теплообменниках**



П р и м е ч а н и е: *a* – с одним ходом в межтрубном пространстве и двумя, четырьмя, шестью и более ходами в трубном пространстве; *b* – с двумя ходами в межтрубном пространстве с поперечными перегородками и четырьмя ходами в трубном пространстве.

### Соотношения между некоторыми единицами физических величин

$$1 \text{ кг} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2 / \text{м};$$

$$1 \text{ Н} = 0,102 \text{ кгс}; 1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н};$$

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 10^{-5} \text{ бар} = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ атм} = 0,102 \text{ мм рт.ст.};$$

$$1 \text{ ккал} = 4,19 \text{ кДж};$$

$$1 \text{ Вт} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м/с} = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ л.с.} = 0,86 \text{ ккал/ч};$$

$$1 \text{ ккал/ч} = 1,163 \text{ Вт};$$

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 860 \text{ ккал};$$

$$1 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} = 0,239 \cdot 10^{-3} \text{ ккал/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$1 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} = 0,86 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К)}.$$

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

### **Программа подготовки «Экологический инжиниринг»**

Программа подготовки «Экологический инжиниринг» была создана на базе кафедры «Промышленной экологии» и кафедры «Безопасности жизнедеятельности и промышленной теплотехники». Программа направлена на проведение мультидисциплинарных исследований в области взаимодействия промышленности с окружающей средой, предотвращения загрязнения, и охраны окружающей среды в сотрудничестве с ведущими зарубежными университетами и научно-исследовательскими институтами. Реализуются совместные образовательные программы с университетами прикладных наук Лахти и Миккели (Финляндия), Baltic University Programme Университета г. Уппсала (Швеция) и Чешским университетом естественных наук в Праге (Чехия). Ведётся сотрудничество с ведущими научно-исследовательскими центрами Германии – Вуппертальским институтом климата, окружающей среды и энергии и Институтом «Фактор 10». Для проведения научно-исследовательской деятельности созданы следующие лаборатории: учебно-научная лаборатория «Промышленной экологии»; лаборатория биотестирования; лаборатория экомониторинга. Основной задачей лаборатории промышленной экологии является проблемно-ориентированное обучение в области техники защиты окружающей среды, процессов и аппаратов для очистки сточных вод и газопылевых выбросов. В лаборатории биотестирования проводятся исследования токсичности объектов экосистем. Лаборатория экомониторинга занимается эколого-аналитическими исследованиями при проектировании и эксплуатации промышленных предприятий и объектов инфраструктуры.

Рахманов Юрий Алексеевич

**Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в  
химической технологии**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав.РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на