



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный  
технический университет**

---

---

**Кафедра «Промышленная теплоэнергетика  
и теплотехника»**

# **СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ**

**Методические указания и задания**

**Минск  
БНТУ  
2014**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»

СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА  
И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ

Методические указания и задания  
к курсовой работе для студентов специальности  
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»

Минск  
БНТУ  
2014

УДК 658.26+697.2/.3(075.8)  
ББК 31.3я7  
С40

Составители:

*М. А. Ярмольчик, Ю. П. Ярмольчик*

Рецензенты:

*И. А. Бокун, Н. Б. Карницкий*

Методические указания предназначены для оказания помощи студентам при выполнении курсовой работы.

Излагаются основные положения основ систем производства и распределения энергоносителей, приводятся варианты заданий курсовой работы. К каждому разделу дисциплины разработаны методические указания, способствующие более глубокому изучению и усвоению материала.

Материал методической части подобран и изложен таким образом, чтобы сосредоточить внимание студентов на основных, наиболее важных вопросах по дисциплине «Системы производства и распределения энергоносителей».

## Предисловие

Дисциплина «Системы производства и распределения энергоносителей» играет важную роль в формировании инженера-теплоэнергетика, работающего как на промышленных предприятиях, в энергетике, так и в других энергопотребляющих отраслях народного хозяйства.

Производство промышленной продукции с использованием современных высокоэффективных теплотехнологий требует использования в технологических циклах целого ряда энергоносителей, обеспечивающих температурные режимы и другие оптимальные условия, позволяющие получать конкурентоспособный, качественный продукт. Энергоносители, используемые в современном производстве, должны иметь строго определенные для конкретного технологического процесса параметры, химический состав и физические характеристики. Это значительно усложняет задачу их производства, транспорта и распределения.

Важность подготовки инженеров-теплоэнергетиков в области систем производства и распределения энергоносителей трудно переоценить. Одной из основных проблем, стоящих перед современным промышленным производством, является проблема экономии и рационального использования топливно-энергетических ресурсов, включающая в себя рациональную сбалансированность производства и потребления энергоносителей. Энергетическая эффективность многих технологических процессов пока еще чрезвычайно низка, так как технологии, лежащие в основе соответствующих процессов, зачастую не ставят во главу угла вопросы экономии энергоносителей. Конкурентоспособность ряда производств в Республике Беларусь, где наблюдается дефицит топливно-энергетических ресурсов, в значительной мере связана с разработкой энергосберегающих технологий, включающих в себя эффективное производство и распределение различных энергоносителей со строго определенными для того или иного процесса параметрами.

Изучение дисциплины «Системы производства и распределения энергоносителей» студентами, обучающимися по специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника», является основой для более глубокого изучения современных энергетических систем для различных отраслей народного хозяйства с целью максимальной экономии топлива и других энергоносителей, интенсификации и оптимизации современных теплотехнологических процессов и целых энергетических систем.

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Процесс обучения студентов по данной дисциплине включает:

- получение информации на лекциях;
- самостоятельную работу над учебниками и учебно-методическими пособиями;
- выполнение контрольных и лабораторных работ;
- приобретение навыков решения конкретных задач на практических занятиях;
- получение консультаций на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» по вопросам, возникающим при изучении материала.

Для более глубокого усвоения и закрепления материала предлагается ответить на вопросы для самопроверки, которые приводятся в настоящем издании к каждому разделу курса.

При выполнении курсовой работы необходимо соблюдать следующие требования. Вначале должны быть четко выписаны заданные по условию исходные параметры и определена конечная цель задания. Все вычисления необходимо проводить, пользуясь Международной системой единиц (СИ), и приводить в развернутом виде. При использовании табличных значений величин (теплофизических характеристик, вспомогательных функций и коэффициентов), уравнений подобия, графических зависимостей необходимо давать ссылки на используемые источники. Решения каждого пункта задания следует сопровождать кратким пояснительным текстом и указывать, какая из величин определяется расчетным путем либо выбирается из справочников, учебных и учебно-вспомогательных пособий и т. д.

Курсовая работа включает расчетно-пояснительную записку общим объемом 10–15 страниц рукописного текста и графическую часть, которая выполняется на миллиметровой бумаге в стандартных масштабах.

Задания к курсовой работе представлены вариантами, соответствующими номеру фамилии студента в журнале или ведомости.

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАЗДЕЛАМ ДИСЦИПЛИНЫ

## *Введение*

Изучению дисциплины «Системы производства и распределения энергоносителей» должен предшествовать глубокий анализ современного состояния энергетики в Республике Беларусь, путей совершенствования теплотехнического оборудования, теплоэнергетических технологий и энергетических схем промышленных предприятий. Важным фактором в дальнейшем развитии энергетической отрасли в Республике Беларусь являются углубляющие связи с Российской Федерацией, странами СНГ, а также с другими странами в рамках более открытого сотрудничества по обмену опытом, новыми технологиями и конструктивными идеями в области систем производства и распределения энергоносителей. Расширение экономических связей с Россией приводит теплоэнергетику Республики Беларусь, с одной стороны, к унификации теплотехнического оборудования, а с другой – к интенсивному принятию и внедрению новейших теплотехнических технологий, наиболее адаптированных к условиям Беларуси. Важнейшими факторами являются также эффективные системы производства и распределения энергоносителей.

Специалистам энергетических служб промышленных предприятий, задачей которых является квалифицированное использование энергоресурсов, прежде всего необходимо знать наиболее эффективные пути получения, транспорта и распределения топливных ресурсов – газообразного топлива, мазута, различных видов твердого топлива. Рассмотрение этой части настоящего курса выделено в отдельную дисциплину «Топливоснабжение промышленных предприятий», которая изучается студентами специальности «Промышленная теплоэнергетика» в предыдущих семестрах, поэтому изучение дисциплины «Системы производства и распределения энергоносителей» ограничивается специфическими энергоносителями, среди которых

особое место занимает водоснабжение промышленного предприятия. Помимо этого в программу дисциплины входят изучение систем приготовления и распределения контролируемых и защитных атмосфер; вопросы производства и снабжения технологий холодом и сжатым воздухом, продуктами разделения воздуха – кислородом и азотом.

## ***1. СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ***

**1.1. Основные направления использования воды на промышленном предприятии.** Особое внимание при разработке схем промышленного водоснабжения следует обратить на комплексное использование воды предприятиями, расположенными в крупных промышленных регионах. При этом появляется возможность объединения предприятий или хотя бы отдельных производств по водоснабжению и использованию одним предприятием (технологией) воды, не пригодной для использования на другом предприятии, а также возможность объединения стоков, требующих одинаковых методов очистки. Это приводит к экономии воды из природных источников водоснабжения, сохраняя их как источники воды высокого качества.

По *происхождению* различают следующие основные виды технологической (технической) воды в системах водоснабжения:

реакционные воды (результат химических реакций с образованием воды);

воды, содержащиеся в сырье и исходных продуктах (свободная или связанная вода, содержащаяся в нефти, угле и др.);

маточные водные растворы (образуются в результате процессов получения или переработки продуктов в водных растворах и средах);

водные растворы и абсорбционные жидкости (образуются при использовании воды в качестве экстрагента или абсорбента, например, МЭА).

По назначению различают:

охлаждающие воды (используются в технологиях для охлаждения аппаратов и продуктов);

воды для транспорта исходного сырья и продуктов его переработки в системах гидротранспорта (удаление золы и др.);  
промывочные воды.

Разграничение в видах воды в значительной степени связано с условиями очистки технологических стоков, в дальнейшем поступающих в систему технического водоснабжения предприятия для повторного использования. Особое внимание необходимо обратить на ПДК (предельно допустимые концентрации) вредных веществ в водоемах санитарно-бытового водоснабжения. Рассмотреть удельные расходы воды на производство различных видов промышленной продукции.

**1.2. Методы определения расчетной потребности в воде на нужды технологии.** Системы водоснабжения промышленных предприятий подразделяются на три группы: хозяйственно-питьевые, производственные и противопожарные. Основным фактором, определяющим режим работы всех элементов заводского водоснабжения, является режим расходования воды различными системами водоснабжения. Для составления режима расходования воды задаются картами технологических процессов и отдельных переходов. При этом определяются наибольшие часовые расходы  $V_i^{\max}$  технологий и цехов  $\Sigma V_i^{\max}$ , а также  $V_i^{\min}$  и  $\Sigma V_i^{\min}$ . Из расходов воды цехами складываются значения  $\Sigma V_i^{\max}$  и  $\Sigma V_i^{\min}$  общезаводского потребления технической воды. Существенное влияние на график суточного потребления технической воды оказывает сменность работы технологий.

Подача воды на нужды пожаротушения возлагается на производственный водопровод. Необходимо рассмотреть факторы, влияющие на расход воды для пожаротушения: степень огнестойкости здания, категории производства по пожарной опасности, площадь и ширину здания.

Расчетные среднесуточные расходы воды на хозяйственно-питьевые нужды по предприятию определяют в соответствии



со степенью благоустройства работающих (наличие душевых, ванн, оборудование местными водонагревателями или централизованным горячим водоснабжением). При проектировании системы хозяйственно-питьевого водопровода нужно помнить, что он выполняется отдельно от водопроводов потребителей других групп.

### **1.3. Характеристика потребителей технической воды и требования к параметрам и надежности водоснабжения.**

Требования к количеству и качеству воды для производственных целей определяются характером технологии, при этом одной из специфических особенностей производственного водоснабжения в ряде случаев является зависимость объема потребляемой воды от ее качества (температуры, солевого состава и т. п.), поэтому очень важно соблюдать требования по ПДК различных примесей. Кроме того, отдельные производства предъявляют особые требования к напорам на вводах, что обусловлено типом используемого в технологии оборудования, высотой зданий и т. д. Большое значение имеет обеспечение необходимой степени надежности систем производственного водоснабжения. На ряде предприятий не допускается не только перерыва, но даже незначительного снижения подачи воды в связи с изменением давления или производительности.

**1.4. Сети водоснабжения.** Системы производственного водоснабжения представляют собой комплекс взаимосвязанных сооружений, предназначенных для обеспечения объекта водоснабжения водой. Такая система должна обеспечить:

- отбор воды из природного источника;

- доводку ее качества в соответствии с требованиями потребителя;

- транспортирование ко всем объектам водоснабжения при заданных значениях давления в точках отбора водопроводной сети;

- очистку и охлаждение воды перед повторной подачей к потребителю в соответствии с индивидуальными требованиями к ее качеству.

Система производственного водоснабжения включает:

водозаборные сооружения, обеспечивающие забор воды из выбранных для данного объекта водоснабжения источников; насосные станции, поддерживающие необходимые давление и расход в водопроводах и обеспечивающие транспорт воды к отдельным потребителям;

сооружения для дообработки и очистки воды, улучшающие качество отбираемой природной воды в водопроводные сети; регулирующие емкости;

очистные сооружения (групповые и индивидуальные для отдельных технологий).

Системы производственного водоснабжения классифицируют:

по видам потребителей (хозяйственно-питьевые, производственные, противопожарные);

кратности использования воды, отбираемой из природного источника (оборотные, прямоточные, с последовательным использованием воды в различных технологиях);

виду природных источников (поверхностные – реки, водохранилища, озера, моря; подземные – артезианские и грунтовые).

Системы водоснабжения должны обладать определенной степенью надежности. Под этим понимают свойство объекта сохранять заданные эксплуатационные характеристики. Необходимо рассмотреть основные способы обеспечения требуемой надежности и вероятности безотказной работы.

Расчет сетей заводского водоснабжения будет подробно рассмотрен в примере выполнения задания курсовой работы.

### **1.5. Элементы систем производственного водоснабжения.**

Следует рассмотреть основные элементы и схемы их типового размещения в системах заводского водоснабжения, в том числе с каскадным водоснабжением цехов.

*Охлаждающие устройства.* По способу отвода теплоты охладители делятся на испарительные (отвод теплоты достигается в результате испарения при непосредственном контакте

с воздухом – пруды или водохранилища-охладители, брызгальные бассейны, градирни башенного или вентиляторного типов) и поверхностные (вода движется в трубках, с внешней стороны омываемых воздухом, – радиаторные охладители). Следует привести примеры схем водохранилищ-охладителей. Выбор типа охладителя производится на основе технико-экономического сравнения по минимуму приведенных затрат с учетом показателей работы всей заводской системы. При сопоставлении вариантов учитываются гидрологические и метеорологические условия применительно к району строительства системы водоснабжения. Тепловой расчет охлаждающих устройств заключается либо в определении активной площади водохранилища при заданных тепловой и гидравлической нагрузках, либо размеров брызгального бассейна при заданном расходе воды и плотности орошения, либо размеров градирни при заданном расходе воды и требуемом температурном перепаде.

*Очистные сооружения.* Необходимо рассмотреть основные физико-химические и бактериологические свойства воды, функции и назначение очистных сооружений, наиболее продуктивные методы очистки (флотация; реагентное и электрокоагулирование; скоростное фильтрование; умягчение воды – реагентное, катионитное, диализное; удаление железа; удаление растворенных газов; стабилизация технической и подпиточной воды).

### ***Вопросы для самопроверки***

1. Какие существуют основные виды технической воды в системах водоснабжения по ее происхождению?
2. Какие известны методы очистки воды?
3. Каковы основные функции очистных сооружений?
4. Каковы предельно допустимые концентрации примесей в воде для санитарно-бытового водоснабжения?
5. Начертите схему наливного водохранилища-охладителя.
6. Какие существуют виды технической воды в системах водоснабжения по ее назначению?

7. Как подразделяются заводские системы водоснабжения по видам потребителей?
8. Какие факторы определяют режим работы элементов систем заводского водоснабжения?
9. Начертите пример графика водопотребления с отдельными цеховыми технологиями.
10. Что такое расчетные среднесуточные расходы воды на хозяйственные нужды?
11. Что такое и для чего служат системы производственного водоснабжения?
12. Начертите схему водоснабжения промышленного предприятия.
13. Как классифицируются системы производственного водоснабжения?
14. Что такое и как определяется надежность системы водоснабжения?
15. Начертите резервированную и нерезервированную схему систем водоснабжения. Объясните их отличия.
16. Какие требования предъявляются к технической воде?
17. Перечислите элементы систем производственного водоснабжения. Объясните их назначение.
18. Начертите схему производственного водоснабжения с двумя самостоятельными системами.
19. Для чего служат и какие существуют охлаждающие устройства оборотного водоснабжения?
20. Какие существуют сравнительные характеристики охладителей системы оборотного водоснабжения?
21. Опишите методику расчета охладителей систем оборотного водоснабжения.
22. Начертите схему водохранилища-охладителя, образованного на водотоке.

## ***2. СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ И ЗАЩИТНЫХ АТМОСФЕР***

**2.1. Взаимодействие печной атмосферы со стальными изделиями.** Рабочее пространство печи заполнено смесью газов, каждый из которых по-разному взаимодействует с поверхностью изделий, подвергнутых химико-термической обработке. Различные газы по-разному взаимодействуют со сталью и ее сплавами. Характер их воздействия может быть инертным (без взаимодействия), окислительным, восстановительным, науглероживающим, обезуглероживающим, азотирующим. Следует выяснить, какие газы имеют то или иное воздействие на металлы и сплавы. Как правило, контролируемые атмосферы готовят из углеводородного сырья (природного или сжиженного газов). В их состав входят в основном азот, оксид углерода, водород, диоксид углерода и некоторые другие газы (например, метан и аммиак). Характер взаимодействия атмосферы с металлом определяется не только реакциями, протекающими во внешней по отношению к обрабатываемым изделиям среде, но также реакциями на поверхности и диффузионными процессами в глубине насыщаемого слоя изделия.

Контролируемые атмосферы по их действию на стали можно условно разделить:

на инертные атмосферы для защиты от окисления и обезуглероживания;

науглероживающе-восстановительные атмосферы для защиты от окисления, обезуглероживания, для активного науглероживания или обезуглероживания, а также насыщения азотом, алюминием, хромом, бором и т. д.

Следует рассмотреть классификацию печных контролируемых атмосфер, их условные названия, типы, основные способы получения, условные обозначения, объемные доли компонентов, температуры точки росы и краткие характеристики.

**2.2. Генераторы для приготовления контролируемых атмосфер.** В комплексный процесс химико-термической обработ-

ки (ХТО) входит ряд технологических переходов: нагрев и выдержка при определенной температуре, диффузионные процессы, охлаждение со скоростью, предусмотренной закалкой, повторный нагрев и выдержка (например, при отпуске), а также мойка и сушка изделий. В крупносерийном производстве указанные операции осуществляются в сложных механизированных и автоматизированных агрегатах – комплексных автоматических линиях, управляемых ЭВМ. В этом случае ручной труд и влияние субъективных факторов при выполнении контроля качества и регулирования технологического процесса сводятся к минимуму. Технологические зоны таких агрегатов заполнены атмосферой, взаимодействующей с поверхностью обрабатываемых изделий. Конструкция печи обеспечивает стабильность состава атмосферы, высокую интенсивность и технологичность процессов, а также отвечает условиям техники безопасности и промышленной санитарии.

Рассмотрите самостоятельно условия осуществления эндо- и экзотермических реакций, основные конструкции эндотермических и экзотермических генераторов, генераторов для приготовления богатого очищенного экзогаза методом каталитической конверсии и другие типы генераторов.

**2.3. Системы распределения контролируемых атмосфер на промышленном предприятии.** Важное значение имеет рациональный выбор схемы снабжения печей и печных агрегатов контролируемыми атмосферами. При использовании экзотермических атмосфер или атмосфер из аммиака генераторы обычно устанавливаются на специальном участке цеха и все печи снабжаются атмосферой централизованно, по общей магистрали. Если производится экзотермическая атмосфера двух типов (например, очищенный и неочищенный экзогазы), оба типа атмосферы подаются к печам по различным магистралям. Труднее осуществить выбор схемы снабжения атмосферами типа эндо- или экзоэндогаза при цементации или нитроцементации. Это связано с тем, что для различных зон цементационных печей требуется атмосфера различного состава.

Рассмотрите принципиальные схемы централизованного, индивидуального (автономного) и комбинированного снабжения агрегатов защитными атмосферами.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Какие существуют основные виды термической обработки с использованием защитных атмосфер?
2. Как классифицируются газы по их воздействию на металлы и сплавы?
3. Какие основные характеристики и обозначения имеет печная контролируемая атмосфера – водород?
4. Какие основные характеристики и обозначения имеет печная контролируемая атмосфера – диссоциированный аммиак?
5. Какие основные характеристики и обозначения имеет печная контролируемая атмосфера – генераторный газ?
6. Какие основные характеристики и обозначения имеет печная контролируемая атмосфера – эндогаз?
7. Какие основные характеристики и обозначения имеет печная контролируемая атмосфера – экзозендогаз?
8. Какие основные характеристики и обозначения имеет печная контролируемая атмосфера – конвертированный водород?
9. Какие основные характеристики и обозначения имеет печная контролируемая атмосфера – богатый неочищенный экзогаз?
10. Какие основные характеристики и обозначения имеет печная контролируемая атмосфера – богатый очищенный экзогаз?
11. Какие основные характеристики и обозначения имеет печная контролируемая атмосфера – бедный неочищенный экзогаз?
12. Какие основные характеристики и обозначения имеет печная контролируемая атмосфера – бедный очищенный экзогаз?
13. Какие основные характеристики и обозначения имеет печная контролируемая атмосфера – очищенный азот?
14. Начертите принципиальную схему генератора эндотермической атмосферы.

15. Начертите принципиальную схему генератора экзогаза.
16. Начертите принципиальную схему генератора для приготовления богатого очищенного экзогаза методом каталитической конверсии.
17. Какие другие типы генераторов существуют?
18. Начертите принципиальную схему централизованного снабжения агрегатов защитными атмосферами.
19. Начертите принципиальную схему индивидуального (автономного) снабжения агрегатов защитными атмосферами.

### ***3. СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ХОЛОДА***

**3.1. Рефрижераторные установки.** Работа рефрижератора состоит в выработке холода путем отвода теплоты от объекта, температура которого  $T_n$  ниже температуры окружающей среды  $T_{oc}$ . В зависимости от величины  $T_n$  рефрижераторы делятся на две группы: холодильники, работающие при  $T_n$  от минус 50 °С и выше, и криогенные установки, работающие при  $T_n$  ниже минус 150 °С.

По принципу работы рефрижераторные установки подразделяются на *термомеханические*, в основу работы которых положены процессы повышения и понижения давления рабочего тела, и *электромагнитные*, работа которых основана на использовании электрических или магнитных полей. Системы производства холода с установками первого типа находят исключительное применение в промышленности. Они в свою очередь подразделяются на компрессионные, сорбционные и струйные.

В компрессионных рефрижераторах повышение давления рабочего тела (водяной пар, фреон и др.) достигается механическим сжатием или нагреванием, причем в парожидкостных и газожидкостных компрессионных установках агрегатное состояние рабочего тела – конденсация при сжатии и испарение при расширении ( $T < T_{кр}$ ). В газовых компрессионных установках агрегатное состояние рабочего тела в цикле не изменяется, так как в любой его точке  $T > T_{кр}$ .



### **3.2. Компрессионные установки для производства холода.**

Холодильные жидкости, циркулирующие в системах, не должны быть токсичными, горючими, взрывоопасными и разрушающе действующими на элементы оборудования, а в энергетическом отношении они при испарении должны поглощать значительное количество теплоты, имея малые удельные объемы образующихся паров, а также умеренные давления при испарении и конденсации. В этом отношении наиболее дешева, доступна и инертна вода. Однако удельный объем образующихся паров весьма велик, что обуславливает применение воды только в аппаратах струйного типа или турбокомпрессорах.

Рассмотрите хладоагенты и криоагенты, применяемые в системах производства холода, их классификацию, значения пределов взрываемости, степени токсичности, допустимое содержание в воздухе.

Применение воздуха в качестве хладоагента желательно вследствие его большой доступности и абсолютной безвредности для человека. Рассмотрите работу системы производства холода, где в качестве хладоагента используется воздух, принципиальную схему воздушной компрессионной холодильной установки, ее цикл в  $T-S$  координатах.

Хладоагентом в парожидкостных компрессионных холодильных установках служит легкокипящая жидкость, которая при атмосферном давлении кипит при температуре  $T \leq 0$  °С. Рассмотрите принципиальную схему паровой компрессионной холодильной установки с промежуточным хладоносителем, цикл одноступенчатой парожидкостной компрессионной холодильной установки.

Аппараты струйного типа подразделяются на эжекторные и вихревые. Рассмотрите принципиальную схему пароэжекторной холодильной установки.

**3.3. Элементы систем производства холода.** Наиболее важными элементами холодильных установок являются компрессоры, конденсаторы, испарители. Рассмотрите их назна-

чение, классификацию, основные характеристики. Особое внимание следует уделить расчету и выбору типоразмера элементов систем производства холода: компрессора, конденсатора и испарителя.

**3.4. Системы распределения холода.** Различают индивидуальные и централизованные системы распределения холода, которые позволяют обеспечить технологии разных цехов завода, имея только одну станцию производства холода. Ее основным недостатком является большая протяженность трубопроводов и, следовательно, повышенные потери при плохом качестве тепловой изоляции. Рассмотрите принципиальную схему централизованного снабжения холодом цехов промышленного предприятия. Индивидуальные системы целесообразны при небольших единичных мощностях потребителей по холоду, когда легко удастся удовлетворить эти мощности небольшими и дешевыми типовыми компрессорными холодильными машинами.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Как классифицируются холодильные жидкости?
2. Какие пределы взрываемости имеют хладо- и криоагенты?
3. Как классифицируются хладо- и криоагенты по степени токсичности?
4. Каково допустимое содержание в воздухе воспламеняющихся хладо- и криоагентов?
5. Каковы основные свойства хладоносителей на основе солей?
6. Начертите принципиальную схему воздушной компрессионной холодильной установки.
7. Начертите принципиальную схему паровой компрессионной холодильной установки с промежуточным теплоносителем.
8. Разберите цикл одноступенчатой парожидкостной компрессионной холодильной установки.

9. Начертите принципиальную схему пароежекторной холодильной установки.

10. Какие существуют основные элементы систем производства холода? Каково их назначение?

11. Что рассчитывается и какие исходные данные служат для расчета компрессора холодильной установки?

12. Что рассчитывается и какие исходные данные служат для расчета конденсатора холодильной установки?

13. Что рассчитывается и какие исходные данные служат для расчета испарителя холодильной установки?

14. Какие существуют схемы снабжения холодом? В каких случаях целесообразно их применять?

15. Начертите принципиальную схему системы централизованного снабжения холодом цехов промышленного предприятия.

#### **4. СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЖАТОГО ВОЗДУХА НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ**

**4.1. Системы производства сжатого воздуха.** Технологии промышленного производства расходуют значительные объемы сжатого воздуха. Для его получения строятся компрессорные станции, где в качестве основного оборудования используются поршневые, центробежные и осевые компрессоры требуемой производительности. Объекты воздухоснабжения получают сжатый воздух из надземного тупикового разветвленного воздухопровода давлением 0,6–0,8 МПа (для привода пневмоинструмента и технологической оснастки) или 0,32–0,45 МПа (для машиностроительных, автотракторных и металлургических технологий). Применяемые для получения сжатого воздуха машины характеризуются *подачей*  $V$ , м<sup>3</sup>/с, и *степенью повышения давления*  $\epsilon$ , которая представляет собой отношение давлений  $p_2$  и  $p_1$  соответственно на нагнетании и всасывании. Используемые нагнетатели воздуха классифицируются по значению степени

повышения давления  $\varepsilon$  и принципу действия. Так, если  $\varepsilon < 1,15$ , машины для сжатия воздуха классифицируются как *вентиляторы*, а при  $\varepsilon > 1,15$  – как *нагнетатели* (причем если имеется охлаждение воздуха при его сжатии, то нагнетатель называется *компрессором*, а без охлаждения – *воздуходувкой* или *газодувкой*). По принципу действия компрессоры подразделяются на поршневые и роторные, центробежные и осевые (лопастные), а также струйные нагнетатели. Поршневые компрессоры используются при небольшой единичной производительности (менее  $10 \text{ м}^3/\text{с}$ ), но достаточно высоком давлении (более  $0,25 \text{ МПа}$ ). Центробежные компрессоры способны обеспечить подачу воздуха более  $10 \text{ м}^3/\text{с}$  при давлении до  $0,6 \text{ МПа}$ . Осевые машины при большой единичной производительности (до  $3000 \text{ м}^3/\text{с}$ ) способны создавать давление воздуха до  $2 \text{ МПа}$ .

Следует рассмотреть:

- работу поршневого компрессора, его индикаторную диаграмму, методику расчета;

- работу центробежного нагнетателя, методику его расчета;

- графические зависимости характеристик нагнетателей и их пересчет;

- работу компрессоров в сети;

- устойчивость работы компрессора;

- регулирование работы компрессора;

- вспомогательное оборудование: фильтры для очистки воздуха от пыли, промежуточные холодильники, воздухохранилища (ресиверы).

**4.2. Системы распределения сжатого воздуха.** Компрессорная станция завода сооружается в отдельно стоящем здании, в котором основное оборудование (компрессоры) устанавливается на нулевой отметке. Ресиверы и концевые охладители монтируются вне здания.

Рассмотрите схему трубопроводов компрессорной станции.

Для снабжения цеховых потребителей сжатым воздухом сооружаются тупиковые разветвленные воздухопроводы, устрой-

ство и расчет которых сходны с газопроводами. Обычно применяется надземная прокладка трубопровода сжатого воздуха. Рассмотрите принципиальную схему разветвленного тупикового заводского воздухопровода.

### ***Вопросы для самопроверки***

1. Какие существуют основные характеристики машин для получения сжатого воздуха?
2. Как и по каким признакам классифицируются машины для сжатия воздуха?
3. Как работает поршневой компрессор?
4. Что такое индикаторная диаграмма поршневого компрессора? Приведите ее пример.
5. В чем заключается расчет поршневого компрессора?
6. Как работает центробежный нагнетатель?
7. В чем заключается расчет центробежного нагнетателя?
8. Какие существуют характеристики нагнетателей?
9. Что такое пересчет характеристик нагнетателя и по каким параметрам его производят?
10. Как работают компрессоры в сети?
11. Что такое устойчивость работы компрессора? Как она достигается?
12. Какое существует вспомогательное оборудование компрессорных установок? Какие функции они выполняют?
13. Начертите схему трубопроводов компрессорной станции.
14. Начертите схему разветвленного тупикового заводского воздухопровода.

## **5. СИСТЕМЫ И УСТАНОВКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРОДУКТАМИ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА**

**5.1. Роль кислорода в интенсификации технологических процессов.** За счет применения кислорода снижается удельный расход топлива, повышается качество выпускаемой продукции и степень полезного теплоиспользования в технологических процессах. Исключаются потери ряда ценных сырьевых составляющих.

**5.2. Методы промышленного получения кислорода и азота.** Методы промышленного разделения воздуха основаны на его ожижении с последующей низкотемпературной ректификацией. В основу такого разделения положено различие в температуре кипения кислорода и азота (температура кипения азота ниже температуры кипения кислорода: соответственно 77,4 и 90,19 К при 0,1 МПа).

Идеальный процесс ожижения газа ( $T_{о.с} > T_{кр}$ ) может выполняться:

1) отводом теплоты при неизменном начальном давлении и температурах, изменяющихся от  $T_{о.с}$  до температур фазового превращения (процесс реализуется с помощью холодильной машины или криогенной установки);

2) отводом части теплоты при  $T_{о.с} = \text{const}$  в процессе изотермического сжатия в компрессоре, а оставшейся – с помощью охлаждения при понижающейся температуре и  $p = \text{const}$  (процесс реализуется с помощью компрессора и холодильной машины);

3) изотермическим сжатием с последующим адиабатным расширением до давления  $p_{о.с}$  (реализуется с помощью компрессора и дроссельного вентиля).

В промышленности обычно используют 2-й способ. Большое применение получил *квазицикл Капицы*, в котором в качестве нагнетателя используется низконапорный ( $p_2 = 0,5\text{--}0,7$  МПа)

турбокомпрессор, КПД и производительность которого выше, чем у поршневого компрессора. Рассмотрите схему установки и график цикла в  $T$ - $S$  координатах.

Охлаждение и ожижение воздуха является предварительным этапом его разделения. Жидкий воздух подвергается разделению путем низкотемпературной ректификации, когда смесь жидкостей  $O_2$  и  $N_2$  подвергается многократно повторяющимся частичным испарениям и конденсации. При этом пар, находящийся в равновесии с жидкостью, содержит больше вещества с низкой температурой кипения, а жидкость соответственно обедняется низкокипящей компонентой (азотом). Рассмотрите принципиальные схемы колонн однократной и двукратной низкотемпературной ректификации.

**5.3. Установки для производства кислорода.** Промышленные установки для получения газообразного кислорода по производительности классифицируются следующим образом:

малой производительности ( $8,3 \cdot 10^{-3}$ – $6,9 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с);

средней производительности ( $8,3 \cdot 10^{-2}$ – $1,0$  м<sup>3</sup>/с);

высокой производительности (более 1,39 м<sup>3</sup>/с).

В установках средней и высокой производительности предусматривается возможность получения ряда инертных газов (аргон, ксенон и др.). В установках малой производительности применяется высокое (10–20 МПа) и среднее (3–5 МПа) давление воздуха. В установках средней и высокой производительности, как правило, используется низкое давление воздуха (0,5–0,8 МПа), создаваемое турбокомпрессором (квазицикл Капицы).

Рассмотрите схему типовой установки К<sub>Г</sub>-300М, особенности других установок.

**5.4. Техника безопасности в кислородном хозяйстве.** Контакт кислорода с органическими соединениями может вызвать взрыв. Газообразный кислород плотнее воздуха (плотность кислорода равна 1,43 кг/м<sup>3</sup>), поэтому при утечке он скапливается внизу помещений (особую опасность в этом отношении пред-

ставляют подвалы, проходные каналы промразвонок и различного рода приямки).

При работе с газообразным кислородом необходимо соблюдать следующие требования:

1. Поверхности предметов, расположенных вблизи мест наличия кислорода, должны быть тщательно очищены от масла и жировых пятен растворителями (четырёххлористый углерод, трихлорэтилен и др.). При работе с растворителями нужно помнить об их токсичности.

2. При работе с открытым пламенем в местах возможного присутствия кислорода необходимо предварительно отобрать пробу окружающего воздуха и определить содержание в ней кислорода.

3. При выполнении внутренних ремонтных работ разного рода емкостей, трубопроводов с применением открытого пламени необходимо предварительно произвести продувку системы азотом, водяным паром или воздухом.

4. В помещении, где возможно присутствие кислорода, электропроводку выполняют во взрывобезопасном исполнении.

5. При ремонтных работах оборудования и кислородопроводов нужно пользоваться инструментом, исключающим возможность искробразования (неметаллический, обмедненный).

6. Одежду, в которой производились работы с кислородом, и обтирочные материалы после выполнения работ необходимо проветривать на открытом воздухе.

7. Не допускать попадания кислорода на кожный покров человека, так как при этом происходит обмораживание, что приводит к тяжелым последствиям. Также необходимо избегать прикосновения к холодным частям кислородных установок.

8. Шланги, по которым транспортируется жидкий кислород, следует продувать, чтобы предотвратить в них повышение давления от испарения кислорода.

9. При выполнении ремонтных работ в среде, содержащей менее 18 % кислорода, необходимо пользоваться автономной



системой дыхания, так как снижение содержания кислорода в воздухе до 18 % представляет опасность для человека, до 15–16 % – приводит к потере сознания.

10. На случай аварий с изотермическими емкостями кислорода должен быть предусмотрен сток жидкости в специальные лотки, а затем в сборники.

11. Изотермические емкости с массой кислорода, не превышающей 1000 т, можно располагать с внешней стороны зданий непосредственно у их стен.

12. Для предупреждения разрыва изотермической емкости для хранения кислорода необходимо предусмотреть свободный выход газообразной фазы. С этой целью изотермические емкости снабжаются взрывными клапанами согласно СНиП.

### ***Вопросы для самопроверки***

1. Для чего в технологических процессах используется кислород?

2. На чем основаны методы промышленного получения продуктов разделения воздуха?

3. Как может происходить идеальный процесс ожижения газа?

4. Что такое квазицикл Капицы? Начертите принципиальную схему установки с турбокомпрессором и цикл в  $T$ - $S$  координатах.

5. Как происходит разделение воздуха?

6. Изобразите схему колонны однократной низкотемпературной ректификации.

7. Изобразите схему колонны двукратной низкотемпературной ректификации.

8. Как классифицируются установки для производства кислорода?

9. Начертите и объясните схему установки  $K_r$ -300М.

10. Какие требования необходимо соблюдать при работе с газообразным кислородом?

# ЗАДАНИЕ

## к курсовой работе

### «Рассчитать кольцевую сеть для водоснабжения промышленного предприятия»

**Дано:**

Сеть (рис. 1а–1б) состоит из двух смежных колец I и II. Направления путевых расходов  $q_{i-j}$  линий указаны предположительно.

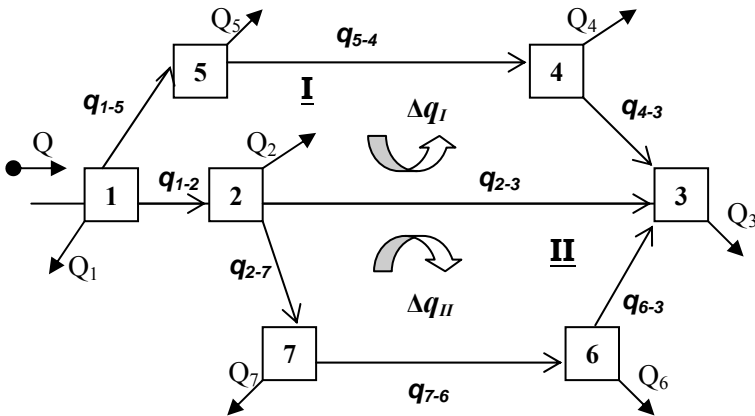


Рис. 1а

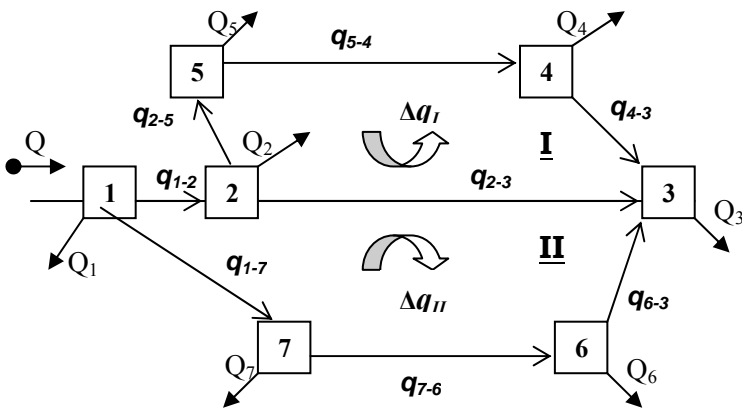


Рис. 1б

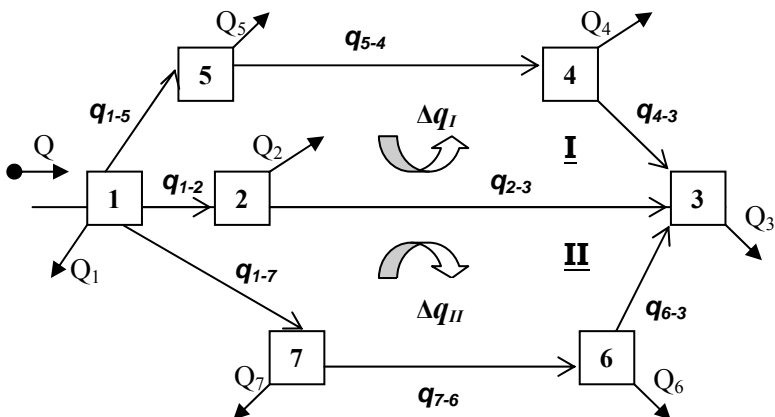


Рис. 18

В период наибольшего расчетного водопотребления из сети забирается вода в количестве

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i,$$

где  $Q_i$  – отбор в отдельных  $n$  точках сети, л/с.

$l_{i-j}$  – длины участков от точки  $i$  до точки  $j$ , м;

$\mathcal{E}_{i-j}$  – экономический фактор, учитывающий влияние стоимости энергии, укладки труб, величины амортизационных отчислений и т. п. для каждого участка сети от точки  $i$  до точки  $j$ .

Данные для вариантов выбрать из следующей таблицы в соответствии с номером в журнале (ведомости).

## Исходные данные

Дано	Номер по журналу (ведомости)																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Схема	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	
$Q_1$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	
$Q_2$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
$Q_3$	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	
$Q_4$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	
$Q_5$	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
$Q_6$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	
$Q_7$	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
$I_{1-5}$	300	-	500	350	-	450	400	-	400	450	-	350	500	-	300	200	-	300	400	-	500	400	-	450	400	
$I_{4-4}$	600	800	700	650	750	650	700	700	600	750	650	550	800	600	500	500	600	800	700	650	550	650	700	700	600	
$I_{4-3}$	200	300	350	250	400	400	300	450	450	350	300	400	300	350	300	400	300	450	450	350	350	400	300	400	300	
$I_{4-2}$	50	100	50	100	100	50	150	150	200	200	150	250	300	200	50	100	100	50	150	150	200	200	200	150	150	
$I_{2-3}$	600	700	600	650	650	550	700	600	500	750	550	450	800	500	400	650	650	550	700	600	500	750	550	450	800	
$I_{2-7}$	250	-	-	300	-	-	350	-	-	400	-	-	450	-	-	500	-	-	550	-	-	600	-	-	650	
$I_{7-6}$	450	600	500	500	550	450	550	500	400	600	450	350	650	400	300	500	550	450	550	400	600	450	350	650	650	
$I_{6-3}$	200	300	250	250	300	250	300	250	200	350	200	150	400	200	100	300	250	250	300	250	300	250	200	350	200	
$I_{1-7}$	-	350	300	-	350	300	-	300	250	-	300	200	-	300	200	-	350	300	-	300	250	-	300	200	-	
$I_{2-5}$	-	250	-	-	350	-	-	400	-	-	300	-	-	250	-	-	250	-	-	350	-	-	400	-	-	
$\mathcal{U}_{1-5}$	1,5	-	0,8	0,5	-	0,7	1	-	1	0,8	-	0,5	0,9	-	1	1	0,8	-	1	0,8	-	0,5	0,9	-	1	1,3
$\mathcal{U}_{5-4}$	2	1,5	1	1	0,8	1	1,2	1,5	1	1	1	0,8	0,8	2	1,5	1	0,8	1	1,2	1,5	1	1	1	1	0,8	0,8
$\mathcal{U}_{4-3}$	2,5	2	1,5	1	1	1	1,5	2	2	2	1,5	1	1	2	1,5	2	1,5	1	1	1,5	2	2	2	2	1,5	1,5
$\mathcal{U}_{1-2}$	3	2,5	2	1,5	1	1,5	2	2,5	3	2,5	2	1,5	1	2,5	2	1,5	1	1,5	2	2,5	1,5	2,5	2	1,5	1	1
$\mathcal{U}_{2-3}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\mathcal{U}_{2-7}$	0,8	-	0,5	-	0,5	-	0,2	-	-	0,6	-	-	0,3	-	-	0,6	-	-	0,6	-	-	0,6	-	-	0,8	0,8
$\mathcal{U}_{7-6}$	0,5	0,4	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,9	0,9	
$\mathcal{U}_{6-3}$	1	0,8	0,7	0,6	0,6	1	0,8	0,7	0,5	0,4	0,9	1	0,8	0,6	0,5	1	0,8	0,7	0,5	0,9	0,8	1	0,8	0,7	0,5	
$\mathcal{U}_{1-7}$	-	0,2	1	-	0,9	0,5	-	0,9	0,6	-	1	0,4	-	0,8	0,7	-	0,9	0,7	-	0,9	0,6	-	1	0,7	-	
$\mathcal{U}_{2-5}$	-	1	-	-	0,5	-	-	1	-	-	0,5	-	-	1	-	-	1	-	-	0,8	-	-	1	-	-	
$h_{нпб}$	3	4	5	6	7	8	3	4	5	6	7	8	6	7	8	3	4	5	6	7	8	3	4	5	6	

**Найти:**

- диаметры всех водопроводных линий  $D_{i-j}$ ;
- скорости течения воды на всех участках сети  $v_{i-j}$ ;
- величины потерь напора  $h_{i-j}$  на всех участках сети;
- уточнить направления течения воды на всех участках сети;
- исправленные (за счет перебрасываемых) значения расчетных расходов  $Q'_i$  (или  $Q''_i$  и т. д.) в каждой точке отбора;
- минимальный необходимый напор сети  $h_{\min}$ ;
- требуемый напор  $h_{\text{сети}}$  и суммарный расход воды  $Q$  в сети (основные характеристики насоса и (или) водонапорной башни).

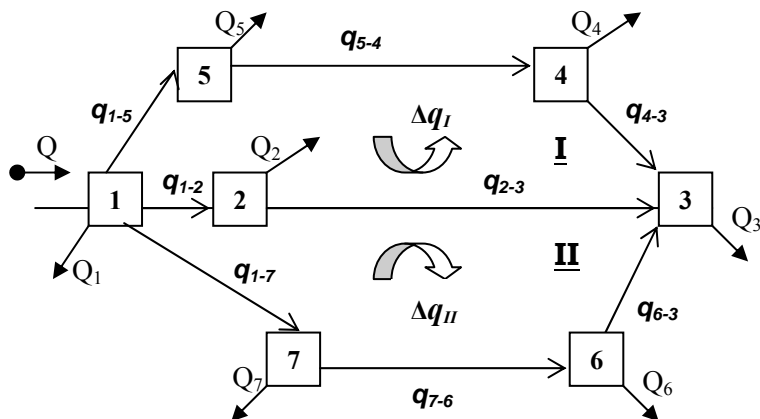
**Начертить:**

- схему сети (в масштабе) в соответствии со схемой задания (см. рис. 1а–1в) с указанием найденных величин;
- таблицу всех найденных характеристик по отдельным участкам сети.

## МЕТОДИКА И ПРИМЕР РАСЧЕТА

**Дано:** Сеть состоит из двух смежных колец I и II.

Направление путевых расходов  $q_{i-j}$  линий водопотребления из сети указаны предположительно.



В период наибольшего расчетного водопотребления из сети вода забирается в количестве  $Q = \sum Q_i$ , где  $Q$  – отбор в отдельных  $n$  точках сети, л/с;  $l_{i-j}$  – длины участков от точки  $i$  до точки  $j$ , м.

$\varepsilon_{i-j}$  – экономический фактор, учитывающий влияние стоимости укладки труб, величины амортизационных отчислений по участкам и т. д. Чем выше  $\varepsilon_{i-j}$ , тем выгоднее прокладывать трубы большего диаметра. Этот коэффициент, как правило, рассчитывается экономическими службами предприятия.

Расход на участках, л/с	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$
		21	26	52	24	25	21

Участок	1–5	5–4	4–3	1–2	2–3	1–7	7–6	6–3
Длины участков, м	350	550	300	150	450	200	350	150
Экономический фактор	0,5	0,8	1	1,5	1	0,4	0,8	1

Величина потерь напора  $h_{изб} = 8$  м.

## Расчет

1. Находим общий расчетный водозабор из сети всеми объектами водопотребления  $Q$ :

$$Q_{л/с} = \sum_{n=1}^7 Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 = \\ = 21 + 26 + 52 + 24 + 25 + 21 + 23 = 192 \text{ л/с};$$

$$Q = Q_{л/с} / 1000 = 192 / 1000 = 0,192 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Для определения путевых расходов всех участков сети находим эквивалентные экономические длины каждого из участков:

$$l_{i-j}^э = \frac{l_{i-j}}{\Theta_{i-j}}, \text{ м}.$$

$l_{1-5}^э$	$l_{5-4}^э$	$l_{4-3}^э$	$l_{1-2}^э$	$l_{2-3}^э$	$l_{1-7}^э$	$l_{7-6}^э$	$l_{6-3}^э$
700	687,5	300	100	450	500	437,5	150

3. Находим суммарные эквивалентные экономические длины всех возможных путей от водозабора из внешней сети до углового потребителя, имеющего возможность потребления из нескольких различных ветвей сети:

ветвь 1:

$$L_1^э = l_{1-5}^э + l_{5-4}^э + l_{4-3}^э = 700 + 687,5 + 300 = 1687,5 \text{ м};$$

ветвь 2:

$$L_2^э = l_{1-2}^э + l_{2-3}^э = 100 + 450 = 550 \text{ м};$$

ветвь 3:

$$L_3^3 = l_{1-7}^3 + l_{7-6}^3 + l_{6-3}^3 = 500 + 437,5 + 150 = 1087,5 \text{ м.}$$

4. Находим доли водоподачи узловому потребителю, поступающие по разным ветвям сети:

$$K_i = \frac{\sum_{i=1}^n L_i^3 - L_i^3}{\sum_{i=1}^n L_i^3} \cdot \frac{1}{(n-1)},$$

где  $i$  – номер ветви,  $n = 3$  – количество ветвей.

$$K_1 = \frac{3325 - 1687,5}{3325} \cdot \frac{1}{3-1} = 0,25;$$

$$K_2 = \frac{3325 - 550}{3325} \cdot \frac{1}{3-1} = 0,42;$$

$$K_3 = \frac{3325 - 1087,5}{3325} \cdot \frac{1}{3-1} = 0,34.$$

При проверке  $\sum K_i = 1$ , имеем 1.

5. Находим подачу воды узловому потребителю, поступающую по разным ветвям сети:

$$q_{4-3} = Q_3 \cdot K_1 = 0,052 \cdot 0,25 = 0,013 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{2-3} = Q_3 \cdot K_2 = 0,052 \cdot 0,42 = 0,0218 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{6-3} = Q_3 \cdot K_3 = 0,052 \cdot 0,33 = 0,0172 \text{ м}^3/\text{с}.$$



6. Находим путевые расходы на каждом участке пути:

$$q_{1-5} = Q_5 + Q_4 + Q_3 \cdot K_1 = 0,025 + 0,024 + 0,0128 = 0,0618 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{5-4} = Q_4 + Q_3 \cdot K_1 = 0,024 + 0,013 = 0,037 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{4-3} = Q_3 \cdot K_1 = 0,0172 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{1-2} = Q_2 + Q_3 \cdot K_2 = 0,026 + 0,0218 = 0,0478 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{2-3} = Q_3 \cdot K_2 = 0,0218 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{1-7} = Q_7 + Q_6 + Q_3 \cdot K_3 = 0,023 + 0,021 + 0,0172 = 0,0612 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{7-6} = Q_6 + Q_3 \cdot K_3 = 0,021 + 0,0172 = 0,0382 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{6-3} = Q_3 \cdot K_3 = 0,0382 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проверка:

$$Q - Q_1 = q_{1-2} + q_{1-5} + q_{1-7}.$$

Имеем

$$0,1702 = 0,1702.$$

7. Находим экономические диаметры отдельных водопроводных линий:

$$D_{i-j} = \mathfrak{D}_{i-j}^x \cdot q_{i-j}^{3x},$$

где  $x = 0,14$  – теоретическое значение для труб среднего диаметра (для расходов до 200 л/с);

$x = 0,15$  – для расходов от 200 до 500 л/с;

$x = 0,16$  – для расходов свыше 500 л/с.

8. Подбираем ближайшие по значению диаметры стандартных труб из следующего ряда:

Ø50; 75; 100; 125; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500 и далее через 100.

Участки	$D_{1-5}$	$D_{5-4}$	$D_{4-3}$	$D_{1-2}$	$D_{2-3}$	$D_{1-7}$	$D_{7-6}$	$D_{6-3}$
Экономические диаметры, мм	281	242	160	295	200	272	247	183
Нормализованные диаметры, мм	300	250	150	300	200	300	250	150

9. Проверяем соответствие выбранных диаметров рекомендуемому диапазону экономических скоростей. Среднее значение экономических скоростей рекомендовано выбирать в пределах:

- для труб малых и средних диаметров (до 500 мм) 0,6–0,9 м/с;
- для труб больших диаметров (свыше 500 мм) 0,9–1,2 м/с.

В зависимости от назначения и технологических требований возможны более широкие пределы скоростей: 0–3 м/с. Большие скорости способствуют возникновению гидравлических ударов, снижение скоростей менее рекомендуемой приводит к повышенным капитальным вложениям.

$$v_{i-j} = \frac{4 \cdot q_{i-j}}{\pi \cdot D_{i-j}^2}, \text{ м/с.}$$

$v_{1-5}$	$v_{5-4}$	$v_{4-3}$	$v_{1-2}$	$v_{2-3}$	$v_{1-7}$	$v_{7-6}$	$v_{6-3}$
0,87	0,75	0,72	0,68	0,69	0,87	0,78	0,99

Все рассчитанные участки соответствуют рекомендуемым скоростям, кроме участка 6–3. Эти значения превышают рекомендованные, однако при увеличении диаметра скорости снизятся ниже рекомендованных, поэтому в дальнейших расчетах принимаем рассчитанные скорости.

Результаты расчетов сводим в таблицу.

Участок сети	$l$ , м	$l_3$ , м	$q$ , м <sup>3</sup> /с	$D$ , мм	$v$ , м/с
1–5	350	700	0,0618	300	0,87
5–4	550	687,5	0,0368	250	0,75
4–3	300	300	0,0128	150	0,72
1–2	150	100	0,0477	300	0,68
2–3	450	450	0,0217	200	0,69
1–7	200	500	0,0615	300	0,87
7–6	350	437,5	0,0385	250	0,78
6–3	150	150	0,0175	150	0,99

10. Потери напора в стальных и чугунных трубах на единицу длины трубы:

$$i = S_0 \cdot Q^2,$$

где  $S_0$  – удельное сопротивление линий (сопротивление трения, приходящееся на 1 м линии), зависящее от диаметра трубы и шероховатости внутренней поверхности стенок.

Существует ряд эмпирических зависимостей, в том числе таблиц и диаграмм, для определения  $i$  и  $S_0$ , например, проф. Ф. А. Шевелева, и таблиц, созданных на их основе. Для стальных и чугунных труб:

– в области квадратичного сопротивления (при скорости 1,2 м/с)

$$i = 0,00107 \frac{v^2}{D^{1,3}};$$

– переходной области (при  $v < 1,2$  м/с)

$$i = 0,000912 \frac{v^2}{D^{1,3}} \left( 1 + \frac{0,867}{V} \right)^{0,3}. \quad (1)$$

Так как скорости во всех линиях нашего водопровода меньше 1,2 м/с, то используем формулу (1).

$i_{1-5}$	$i_{5-4}$	$i_{4-3}$	$i_{1-2}$	$i_{2-3}$	$i_{1-7}$	$i_{7-6}$	$i_{6-3}$
0,0041	0,0039	0,0071	0,0025	0,0045	0,0041	0,0043	0,0127

11. Находим удельное сопротивление линий:

$$S_0 = \frac{i_{i-j}}{q_{i-j}^2}, \text{ Па/м.}$$

$S_{01-5}$	$S_{05-4}$	$S_{04-3}$	$S_{01-2}$	$S_{02-3}$	$S_{01-7}$	$S_{07-6}$	$S_{06-3}$
1,07	2,89	43,6	1,12	9,57	1,08	2,87	41,58

12. Находим сопротивление всех линий сети по заданным длинам линий:

$$S_{i-j} = S_0^{i-j} \cdot l_{i-j}, \text{ Па.}$$

$S_{1-5}$	$S_{5-4}$	$S_{4-3}$	$S_{1-2}$	$S_{2-3}$	$S_{1-7}$	$S_{7-6}$	$S_{6-3}$
376,1	1590,8	13079,1	167,97	4304,57	215,08	1005,1	6237,06

13. Для упрощения дальнейших расчетов находим произведения

$$S_{i-j} \cdot q_{i-j}.$$

1-5	5-4	4-3	1-2	2-3	1-7	7-6	6-3
23,24	58,54	167,41	8,01	93,41	13,23	38,70	109,15

14. Найдем величины потерь напора на отдельных участках. При этом величинам потерь напора придаются знаки «+» или «-», в зависимости от того, идет ли расход по данной линии по часовой стрелке или против нее:

$$h_{i-j} = S_{i-j} \cdot q_{i-j}^2.$$

Участок сети	I кольцо					II кольцо				
	1-5	5-4	4-3	3-2	2-1	1-2	2-3	3-6	6-7	7-1
Знак	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-
$h_{i-j}$	1,437	2,155	2,144	2,027	0,382	0,382	2,027	1,909	1,49	0,813

15. Из теории гидравлики известно, что *истинное* распределение воды по линиям кольцевой сети характеризуется равенством нулю суммы потерь напора в каждом замкнутом контуре сети или кольце, т. е. идеальным случаем распределения потерь напора по каждому кольцу сети является  $\sum h = 0$ .

В общем случае потери напора по I не равны II и, следовательно,  $\sum h \neq 0$ , а  $\sum h = \Delta h$ , которое называется невязкой кольца.

Найдем невязки колец:

$$\text{I: } \Delta h_{\text{I}} = h_{1-5} + h_{5-4} + h_{4-3} + h_{3-2} + h_{2-1} = 1,437 + 2,155 + 2,144 - 2,027 - 0,382 = 3,327 \text{ м};$$

$$\text{II: } \Delta h_{\text{II}} = h_{1-2} + h_{2-3} + h_{6-7} + h_{3-6} + h_{7-2} = 0,382 + 2,027 - 1,909 - 1,49 - 0,813 = -1,803 \text{ м}.$$

Допустимый предел невязок не должен превышать потери давления смежных линий в данном кольце:

$$\Delta h_{\text{I}}^{\text{lim}} = h_{3-2} = 2,027 \text{ м} \quad \text{и} \quad \Delta h_{\text{II}}^{\text{lim}} = h_{3-6} = -1,909 \text{ м}.$$

Сравниваем значения невязок по кольцу с максимально допустимыми:

$$\Delta h_I > \Delta h_I^{\text{lim}} \quad \text{и} \quad \Delta h_{II} > \Delta h_{II}^{\text{lim}} .$$

Невязки превышают допустимые пределы, знаки («+» для кольца I и «-» для кольца II) показывают, что перегруженными являются периферийные линии сети, а центральная недогружена, поэтому необходима переброска некоторого количества воды с периферийных линий на центральную.

16. Величины перебрасываемых (поправочных) расходов  $\Delta Q$  определяются для каждого кольца:

$$\begin{aligned} \Delta Q_I &= \frac{|\Delta h_I|}{2 \cdot \sum (S_{i-j} \cdot q_{i-j})} = \\ &= \frac{2,027}{2 \cdot (23,24 + 58,55 + 167,47 + 8,01 + 93,41)} = 0,0029 \text{ м}^3/\text{с}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{II} &= \frac{|\Delta h_{II}|}{2 \cdot \sum (S_{i-j} \cdot q_{i-j})} = \\ &= \frac{|-1,909|}{2 \cdot (93,41 + 13,23 + 38,69 + 109,13)} = 0,00375 \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

17. В результате пропуска по сети перебрасываемых расходов в указанном направлении расходы на участках периферийных линий должны уменьшаться, а на участке центральной магистрали (2–3) возрасти:

I кольцо:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{1-5} &= -0,0029 \text{ м}^3/\text{с}, \quad \Delta Q_{5-4} = -0,0029 \text{ м}^3/\text{с}, \\ \Delta Q_{4-3} &= -0,0029 \text{ м}^3/\text{с}, \quad \Delta Q_{3-2} = 0,0067 \text{ м}^3/\text{с}, \\ \Delta Q_{2-1} &= 0,0067 \text{ м}^3/\text{с}; \end{aligned}$$

II кольцо:

$$\Delta Q_{3-6} = -0,0038 \text{ м}^3/\text{с}, \quad \Delta Q_{6-7} = -0,0038 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$\Delta Q_{7-1} = -0,0038 \text{ м}^3/\text{с}, \quad \Delta Q_{1-2} = 0,0067 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$\Delta Q_{2-3} = 0,0067 \text{ м}^3/\text{с}.$$

18. Определим исправленные, за счет перебрасываемых, значения расчетных расходов:

$$q'_{i-j} = q_{i-j} + \Delta Q_{i-j}.$$

$q_{1-5}$	$q_{5-4}$	$q_{4-3}$	$q_{1-2}$	$q_{2-3}$	$q_{1-7}$	$q_{7-6}$	$q_{6-3}$
0,0589	0,0339	0,0099	0,0543	0,0283	0,0577	0,0347	0,0137

19. Далее проводим расчет потерь напора при новых значениях расходов, начиная с п. 7, пока значения невязок не будут удовлетворять необходимым условиям. Все полученные значения сводим в таблицу.

Участки сети	Путевой расход, м <sup>3</sup> /с	Диаметр, мм	Средняя эконом. скорость, м/с	Потери напора в трубах, м <sup>3</sup> /с <sup>2</sup>	Удельное сопротивление линий, Па/м	Сопротивление линий, Па	Потери напора, м	Исправленные путевые расходы, м <sup>3</sup> /с
1-5	0,0618	300	0,87	0,0041	1,07	376,1	1,437	0,0589
5-4	0,0368	250	0,75	0,0039	2,89	1590,8	2,155	0,0339
4-3	0,0128	150	0,72	0,0071	43,6	13079	2,144	0,0099
1-2	0,0477	300	0,68	0,0025	1,12	167,97	0,382	0,0543
2-3	0,0217	200	0,69	0,0045	9,57	4304,6	2,027	0,0283
1-7	0,0615	300	0,87	0,0041	1,08	215,08	0,813	0,0577
7-6	0,0385	250	0,78	0,0043	2,87	1005,1	1,490	0,0347
6-3	0,0175	150	0,99	0,0127	41,58	6237	1,909	0,0137

Кольцо	Потери в смежных линиях, м	Минимальное значение потерь, м	Невязка $\Delta h$ , м	Переброска $\Delta Q$ , м <sup>3</sup> /с
I кольцо	2,144	2,027	3,327	0,0029
	2,027			
II кольцо	2,027	1,909	-2,185	0,0038
	1,909			

Так как значение невязок не удовлетворяют условию  $\Delta h_I > \Delta h_I^{\text{lim}}$  и  $\Delta h_{II} > \Delta h_{II}^{\text{lim}}$ , то повторяем расчет с измененными значениями путевых расходов.

Участки сети	Путевой расход, м <sup>3</sup> /с	Диаметр, мм	Средняя эконом. скорость, м/с	Потери напора в трубах, м <sup>3</sup> /с <sup>2</sup>	Удельное сопротивление линий, Па/м	Сопротивление линий, Па	Потери напора, м	Исправленные путевые расходы, м <sup>3</sup> /с
1-5	0,0589	300	0,83	0,0038	1,08	378,84	1,315	0,0569
5-4	0,0339	250	0,69	0,0034	2,93	1612,2	1,854	0,0319
4-3	0,0099	150	0,56	0,0045	45,57	13670	1,344	0,0079
1-2	0,0543	400	0,53	0,0008	0,26	39,69	0,117	0,0588
2-3	0,0283	200	0,90	0,0074	9,17	4127,9	3,316	0,0328
1-7	0,0577	300	0,82	0,0036	1,09	217,15	0,724	0,0553
7-6	0,0347	250	0,71	0,0035	2,92	1012,9	1,234	0,0323
6-3	0,0137	150	0,78	0,0081	43,1	6465,5	1,121	0,0113

Кольцо	Потери в смежных линиях, м	Минимальное значение потерь, м	Невязка $\Delta h$ , м	Переброска $\Delta Q$ , м <sup>3</sup> /с
I кольцо	1,344	1,344	1,080	0,0020
	3,316			
II кольцо	3,316	1,221	-0,136	0,0024
	1,221			

20. Сеть увязывается – находим необходимый напор для определения высоты напорной башни и/или напорного насоса. Минимально необходимый напор от входа в сеть и до наиболее удаленного потребителя

$$h_I = h_{1-5} + h_{5-4} + h_{4-3} = 1,315 + 1,854 + 1,344 = 4,513 \text{ м};$$

$$h_{II} = h_{1-2} + h_{2-3} = 0,117 + 3,316 = 3,433 \text{ м};$$

$$h_{III} = h_{1-7} + h_{7-6} + h_{6-3} = 0,724 + 1,234 + 1,221 = 3,179 \text{ м}.$$

Если после расчета оказалось, что на каком-либо участке поменялся знак, это означает, что поменялось и направление



движения воды (на чертеже это надо отобразить изменением направления стрелок).

Выбираем наибольший из минимально необходимых напоров от входа в сеть и до наиболее удалённого потребителя – это и будет минимально необходимый напор сети.

Однако для нормальной работы наиболее удаленного потребителя необходимо некое избыточное давление, следовательно, напор, который должен быть в начале сети:

$$h_{\text{под}} = h_{\text{max}} + h_{\text{изб}} = 4,513 + 8 = 12,513 \text{ м.}$$

По полученным значениям подачи  $Q = 192 \text{ л/с} = 0,192 \text{ м}^3/\text{с}$  и необходимого напора  $h_{\text{под}} = 12,513 \text{ м}$  выбираем напорный насос.

### **Графическая часть**

1. На миллиметровой бумаге в масштабе начертить схему сети в соответствии с рис. 1а–1в задания с указанием всех данных и найденных величин (длины участков, расходы потребителей, путевые расходы).

2. Найденные характеристики по отдельным участкам сети свести в таблицу.

## Л и т е р а т у р а

1. Абрамов, Н. Н. Водоснабжение / Н. Н. Абрамов. – М. : Стройиздат, 1982.
2. Системы производства и распределения энергоносителей промышленных предприятий : учебное пособие / В. Г. Лисенко [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск : Высшэйшая школа, 1989.
3. Соколов, Е. Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения / Е. Я. Соколов, В. М. Бродянский. – М. : Энергоиздат, 1981.
4. Энергетика и охрана окружающей среды / под ред. Н. Г. Залогина. – М. : Энергия, 1979.
5. Черкасский, В. М. Насосы, компрессоры, вентиляторы / В. М. Черкасский. – М. : Энергоатомиздат, 1984.

## С о д е р ж а н и е

П р е д и с л о в и е .....	3
Общие указания .....	4
Методические указания к разделам курса.....	5
В в е д е н и е.....	5
1. Системы производственного водоснабжения .....	6
2. Системы производства и распределения контролируемых и защитных атмосфер .....	12
3. Системы производства холода.....	15
4. Системы производства и распределения сжатого воздуха на промышленном предприятии.....	18
5. Системы и установки обеспечения предприятий продуктами разделения воздуха .....	21
Задание к курсовой работе «Рассчитать кольцевую сеть для водоснабжения промышленного предприятия» .....	25
Методика и пример расчета.....	29
Литература.....	41

Учебное издание

## **СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ**

Методические указания и задания  
к курсовой работе для студентов специальности  
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»

Составители:

**ЯРМОЛЬЧИК** Марина Альбертовна  
**ЯРМОЛЬЧИК** Юрий Петрович

Редактор *Т. Н. Микулик*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 26.06.2014. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 2,50. Уч.-изд. л. 1,95. Тираж 100. Заказ 1297.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.

