

China.



ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ПРОЦЕССАМ И АППАРАТАМ

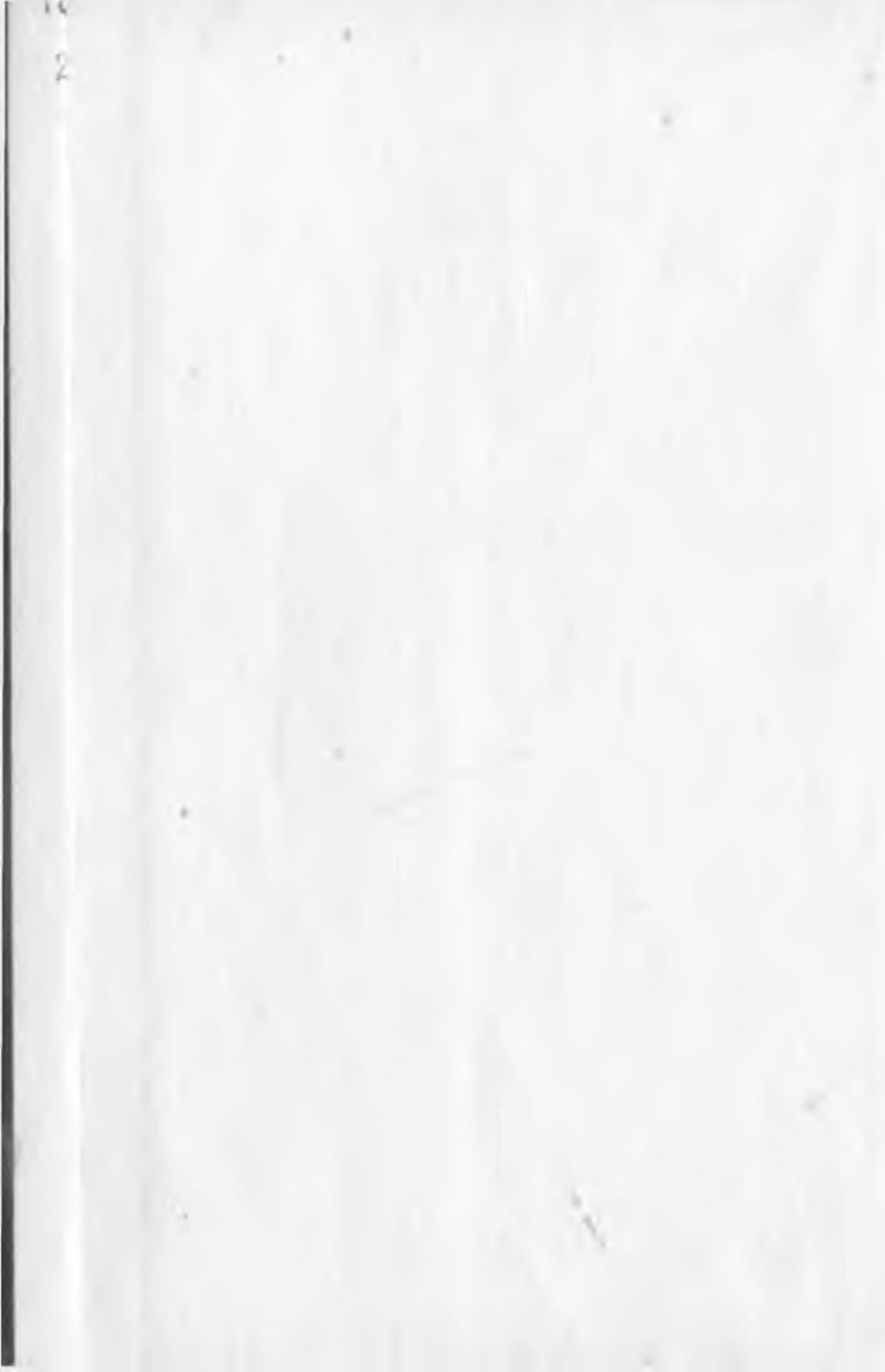
УЧЕБНИКИ ДЛЯ ВУЗОВ

---

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ПРОЦЕССАМ И АППАРАТАМ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

---





УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

---

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ПРОЦЕССАМ И АППАРАТАМ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

---

Под редакцией  
д-ра техн. наук, проф.  
А. С. Гинзбурга

Допущено Государственным комите-  
том СССР по народному образованию  
в качестве учебного пособия для сту-  
дентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности «Тех-  
нология продовольственных продук-  
тов»

ИЗДАНИЕ 3-Е, ПЕРЕРАБОТАННОЕ  
И ДОПОЛНЕННОЕ



МОСКВА ВО «АГРОПРОМИЗДАТ» 1990

ББК 36.81

Л 12

УДК 664.02/.08(07)

Н. Н. Бабьев  
А. С. Васильева  
А. С. Гинзбург  
Ю. П. Грачев  
С. М. Гребенюк  
В. Ф. Журавлев

В. Д. Лазарев  
Л. А. Макарова  
В. П. Митрофанов  
Н. С. Михеева  
И. М. Савина  
В. И. Сыроедов

Редактор А. П. Серик

Рецензенты: кафедра процессов и аппаратов Кемеровского технологического института пищевой промышленности (канд. техн. наук А. Г. Сабуров и канд. техн. наук В. М. Арапов) и д-р техн. наук, проф. А. В. Горбатов

**Лабораторный практикум по процессам и аппаратам пищевых производств/А. С. Гинзбург, С. М. Гребенюк, Н. С. Михеева и др. — М.: Агропромиздат, 1990. — 256 с. — (Учебники и учеб. пособия для студентов высших учебных заведений).**

ISBN 5—10—000866—0.

Даны методические указания к проведению лабораторных занятий по исследованию теплообменных и других процессов и аппаратов.

В третье издание (второе вышло в 1976 г.) в связи с актуальностью решения задач в области интенсификации и оптимизации процессов включены вопросы, связанные с системным анализом и математическим моделированием некоторых процессов, а также уделено внимание анализу их экономичности. За счет исключения некоторых устаревших работ расширена глава, посвященная гидромеханическим процессам.

Для студентов технологических и механических специальностей вузов пищевой промышленности.

Л  $\frac{4001030000-099}{035(01)-90}$  283—89

ББК 36.81

ISBN 5—10—000866—0

© «Пищевая промышленность», 1976

© ВО «Агропромиздат», 1990, с изменениями

Современное пищевое предприятие является сложным производством, оснащенным разнообразными аппаратами. В них протекают технологические процессы, связанные с разными методами обработки пищевых продуктов, — тепловыми, физико-химическими, гидромеханическими и др.

Многие пищевые продукты представляют собой влажные коллоидные капиллярно-пористые тела сложного химического состава. Поэтому методы и режимы обработки продуктов должны выбираться с учетом их технологических свойств и на основе анализа процессов, протекающих внутри самих продуктов.

Создание рациональных конструкций аппаратов требует глубокого знания процессов, протекающих как в рабочей камере, так и в обрабатываемых материалах. Целый ряд процессов пищевых производств (сушка, экстрагирование и др.) являются нестационарными и необратимыми. Они протекают с переменной, обычно убывающей скоростью, так как чем ближе к равновесию, тем меньше движущая сила процесса.

Наиболее совершенным методом расчета таких процессов будет кинетический расчет, увязанный с действительной скоростью течения процесса. К нему приближается зональный метод расчета, который тем точнее, чем больше взято зон.

Рациональная эксплуатация аппаратов и анализ их работы также базируются на глубоком знании теории, конструкции аппаратов и протекающих в них процессов.

В общинженерной подготовке студентов — будущих специалистов пищевой промышленности (механиков, технологов, экономистов) — важную роль играет курс «Процессы и аппараты пищевых производств». Он является переходным от общинженерного цикла дисциплин к специальному: студенты могут использовать знания, полученные в общинженерных дисциплинах, для решения важных практических задач по эксплуатации, расчету и проектированию аппаратов пищевых производств.

Особенность курса «Процессы и аппараты» состоит в его комплексном характере: процессы изучаются с самых разных

сторон — физико-химической, тепловой, механической и т. п., т. е. так, как они в действительности протекают в зависимости от применяемых методов (операций) обработки. Такие операции, как нагревание, охлаждение, сушка, фильтрование и др., имеют общий характер в разных производствах. Поэтому естественно рассмотреть эти процессы в обобщенном курсе на соответствующей научной основе, необходимой для разработки общих методов расчета процессов и аппаратов.

Программа курса «Процессы и аппараты» предусматривает лекции, лабораторные и практические занятия. Цель лабораторного практикума — закрепление знаний по курсу, практическое ознакомление с устройством и работой отдельных аппаратов, изучение процессов на действующих аппаратах, а также приобретение практических навыков пуска, испытания и анализа работы аппаратов.

Для решения актуальных задач перестройки обучения в высшей школе важное значение приобретает всемерное развитие у будущих инженеров навыков самостоятельного технического творчества. Студент должен научиться обосновывать рациональные режимы работы аппаратов и после детального изучения процесса уяснить влияние отдельных параметров режима на ход процесса, т. е. уметь выбрать такой режим, который обеспечивает наибольший технико-экономический эффект при высоком качестве продукта. В целях управления познавательной деятельностью студентов в третье издание практикума включены материалы для самоподготовки при выполнении отдельных работ.

Если ранее повышение производительности аппаратов достигалось экстенсивными методами путем увеличения их габаритных размеров, то в настоящее время ставится задача интенсификации процессов, что обеспечивает возможность сокращения их продолжительности и уменьшения размеров аппаратов. Поэтому в современных условиях круг задач, стоящих перед курсом «Процессы и аппараты», значительно расширяется. В этом курсе наряду с изложением основных закономерностей и методов расчета процессов и аппаратов освещены вопросы интенсификации и оптимизации процессов и способы управления технологическими процессами, т. е. основы технологической кибернетики. Как указывает акад. В. В. Кафаров, для кибернетики как науки предметом исследования являются системы любой природы и их управляемость, методом исследования — математическое моделирование, стратегией исследования — системный анализ и средством исследования — вычислительные машины\*.

Указанные вопросы должны найти отражение как в лекциях

---

\* Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. М., 1987.

и практических занятиях, так и при проведении лабораторных работ по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств». Поэтому в третье издание практикума включены вопросы, связанные с математическим моделированием и системным анализом некоторых процессов. Эти вопросы приобретают особое значение при исследовании нестационарных процессов, например процессов теплообмена.

Математическое моделирование протекает в пять этапов: формулировка физической модели процесса; математическое описание процесса (основное уравнение и краевые условия); перевод математического описания на алгоритм ЭВМ; решение целевой задачи (например, определение полей температуры, кинетических коэффициентов, продолжительности процесса и др.); проверка адекватности решения физической модели процесса.

При изложении отдельных работ дается математическое описание процессов и соответствующие блок-схемы для использования ЭВМ. Данные, полученные на лабораторных установках, могут быть применены для формулировки и уточнения физической модели, а также проверки адекватности решения, т. е. идентификации математической модели. Так, в работе № 3 по исследованию процесса нагревания пластины проверка адекватности производится путем сопоставления экспериментальных значений температуры в разных точках пластины с кривыми температурных полей, построенными на основании решения уравнения теплопроводности при соответствующих краевых условиях и известных (заданных) теплофизических характеристиках или путем нанесения вычисленных значений температуры и сравнения их с экспериментальными кривыми температурных полей. В обратных задачах производится определение кинетических коэффициентов путем обработки экспериментальных данных по формулам, полученным при аналитическом решении основного уравнения процесса. Примером таких расчетов могут служить работа № 8 по определению влагокоэффициентов на основании обработки экспериментальных кривых кинетики сушки и работа № 21 по определению коэффициентов фильтрации. При обработке экспериментальных данных используют современные методы математической статистики, например метод наименьших квадратов, что также нашло отражение в третьем издании практикума.

Технологические процессы пищевых производств, как правило, являются необратимыми комплексными процессами, для которых характерно наложение одних явлений на другие. Примером этого могут служить явления теплообмена, протекающие во многих технологических процессах пищевых производств. Для анализа таких процессов в настоящее время применяют методы термодинамики необратимых процессов (принципы линейности и взаимности).

## Анализ простого уравнения линейности

$$i = LX,$$

где  $i$  — плотность потока (массы, энергии, энтропии);  $L$  — кинетический коэффициент, характеризующий свойства (проводимость потока) самого материала (продукта);  $X$  — движущая сила процесса, характеризующая степень отклонения системы от равновесного состояния.

Показывает, что интенсификация процесса может происходить как вследствие повышения проводимости материала, т. е. целенаправленного изменения их свойств, так и увеличения движущей силы процесса. В связи с этим в практикум включены работы, связанные с изучением не только стационарных, но и нестационарных процессов, а также работы по определению (исследованию) кинетических коэффициентов материалов.

Взаимное влияние явлений тепломассообмена учитывается вторым принципом термодинамики необратимых процессов, принципом взаимности:

$$i_1 = L_{11}X_1 + L_{12}X_2;$$

$$i_2 = L_{21}X_1 + L_{22}X_2,$$

где  $i_1, i_2$  — потоки теплоты и массы;  $X_1, X_2$  — соответствующие движущие силы;  $L_{11}, L_{22}$  — кинетические коэффициенты, учитывающие проводимость потока для единичного явления;  $L_{12}, L_{21}$  — кинетические коэффициенты, учитывающие взаимовлияние явлений (переноса массы на перенос теплоты, и наоборот). Связь между этими коэффициентами определяется равенством:  $L_{12} = L_{21}$ .

Названные принципы термодинамики необратимых процессов могут применяться в тех случаях, когда разные движущие силы являются векторами одного ранга (принцип Кюри).

Перенос влаги, обусловленный созданием в материале градиента температуры (движущая сила переноса теплоты), приобретает важное значение в высокоинтенсивных процессах, например сушке инфракрасными лучами (см. работу № 11).

Исследование процессов и разработка методик расчета аппаратов развиваются в направлении рационального сочетания аналитических и экспериментальных методов. Поэтому в практикуме должное место отводится математическому описанию и анализу процессов, а также теории подобия, синтезирующей аналитические и экспериментальные методы исследования.

В практикум также включены работы, освещающие сравнительно новые способы обработки материалов, например сушка в кипящем слое, сушка инфракрасными лучами, сублимационная сушка.

Для более полного изучения гидравлических и гидромеханических процессов в практикум включены некоторые работы по гидравлике.

При проведении экспериментальных исследований и испытаний важную роль играет оценка достоверности полученных экс-

периментальных данных. В связи с этим в главе I приведена методика статистической обработки результатов наблюдений.

Современная подготовка специалистов в высшей школе, связанная с усвоением обширной информации, вызывает необходимость совершенствовать процесс обучения на научной основе. Увеличение объема информации предъявляет более строгие требования к умению слушать лекции, к самостоятельной работе студентов, подготовке к сдаче зачетов и экзаменов.

Наряду с освоением научных основ предметов студенты должны обладать умением самостоятельного приобретения знаний. Самостоятельность как определенное качество личности является одним из важнейших при обучении в вузе. В постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР «Основные направления перестройки высшего и среднего специального образования в стране» (1987 г.) указано: «Процесс формирования инженерных кадров должен быть подчинен развитию у них навыков самостоятельного технического творчества, системного анализа технико-экономических проблем, умения находить эффективные решения». Значительное место в познавательной деятельности студентов в период обучения занимают разные виды самостоятельной работы: конспектирование первоисточников; проработка лекционного материала, учебников; подготовка к выполнению и защите лабораторных работ; подготовка к коллоквиумам; выполнение домашних заданий, курсовых работ и проектов и т. п.

Для повышения эффективности процесса обучения самостоятельная работа студентов должна планироваться, управляться и контролироваться. Методы управления познавательной деятельностью студентов могут быть разными, но все они должны подчиняться целям обучения.

Упорядоченные конкретные рабочие программы с четко поставленной целью обучения и планируемым уровнем усвоения позволяют отобрать наиболее важный и необходимый для изучения материал и разработать оптимальные методы управления процессом обучения, направленные на повышение познавательной активности студентов, развитие логики их мышления с целью подготовить современного специалиста.

Опыт работы в вузе позволил разработать один из путей управления познавательной деятельностью студентов при выполнении лабораторных работ.

Практика проведения лабораторных занятий наиболее часто предусматривает опрос студентов до выполнения ими работы, так называемый допуск к работе, и опрос после выполнения — защита работы.

Положение, когда при допуске к выполнению работы и защите студентам задаются вопросы одинаковой сложности, не способствует углублению изучения материала, повышению его

усвоения при работе в лаборатории, т. е. снижает значение самой лабораторной работы.

Подготовка материалов для управления познавательной деятельностью студентов при выполнении лабораторных работ предусматривает следующее:

1. Разработку конкретной программы учебного материала, который должен быть усвоен студентами при выполнении каждой лабораторной работы. С этой целью для отдельных лабораторных работ выделяются элементы изучаемого материала (ЭИМ), которые должны быть изучены и усвоены. В качестве ЭИМ могут быть показатели, параметры процесса, работы аппарата; машины, приборы; типы, классы, виды, марки машин, приборов; методы расчета, обработки, исследования; свойства материалов; формулы, уравнения, графики, диаграммы, номограммы; этапы производства и т. п. Число ЭИМ определяется объемом и содержанием работы.

2. Планирование конкретных целей обучения для каждого ЭИМ на разных этапах обучения: при подготовке к выполнению работы и защите выполненной работы.

При этом в соответствии с целью обучения планируется характер мыслительной деятельности студента, которой он должен владеть при изучении каждого ЭИМ, готовясь к выполнению и защите работы.

Цели обучения на разных его этапах по разным ЭИМ могут быть разными, они требуют и разных уровней усвоения соответствующего материала.

Материал, который студент должен знать и уметь воспроизвести, должен быть усвоен на первом уровне — уровне знания. Материал, в области которого студент должен уметь логически мыслить, рассуждать, который он должен уметь анализировать, необходимо усвоить на втором уровне — уровне умения. Материал, которым студент должен владеть, который он должен уметь самостоятельно применять, на основании которого он сможет сделать обобщения, необходимо усвоить на третьем уровне — уровне владения.

В практикуме приведены материалы для управления познавательной деятельностью студентов при самостоятельной подготовке их к выполнению и защите некоторых лабораторных работ.

Глубина изучения (уровень усвоения) одного и того же ЭИМ должна повышаться от подготовки к выполнению работы, в процессе ее выполнения до защиты выполненной работы. Эти материалы являются программой по лабораторной работе; их использование способствует тому, что самостоятельная познавательная деятельность при подготовке к выполнению и защите лабораторных работ имеет конкретную направленность на достижение поставленных целей.

Программы обеспечивают единство изложения материала, а также единство требований преподавателей при проверке усвоения изучаемого материала. Они же являются основой разработки заданий для проверки усвоения изученного материала.

Данный практикум составлен на основании опыта работы лаборатории процессов и аппаратов Московского технологического института пищевой промышленности с учетом опыта работы аналогичных лабораторий химико-технологических и пищевых вузов, в частности Московского института химического машиностроения и Ленинградского технологического института им. Ленсовета. Коллективом Ленинградского технологического института им. Ленсовета написано первое руководство к практическим занятиям в лаборатории процессов и аппаратов химической технологии, а в Киевском технологическом институте пищевой промышленности разработано руководство к лабораторным работам по процессам и аппаратам пищевых производств.

Введение написано А. С. Гинзбургом и Н. С. Михеевой, основы теории процессов теплообмена, сушки, перегонки, работы № 1, 6, 9, 12, методические указания к проведению лабораторных работ — Н. С. Михеевой, работы № 2, 5 — В. Д. Лазаревым, работы № 3, 7, 8, 11 — А. С. Гинзбургом, работа № 4 — С. М. Гребенюком и В. Д. Лазаревым, работы № 10, 18, 20, 22, 23 — В. И. Сыроедовым, работа № 13 — Н. Н. Бабьевым и А. С. Васильевой, работы № 14—17 — Ю. П. Грачевым, Л. А. Макаровой, В. П. Митрофановым и И. М. Савиной, статистическая обработка данных, полученных при выполнении лабораторных работ, — Ю. П. Грачевым, работа № 19 — В. Д. Лазаревым и В. Ф. Журавлевым, работа № 21 — А. С. Гинзбургом и В. Д. Лазаревым, работа № 24 — Н. Н. Бабьевым и В. Д. Лазаревым.

Авторы выражают искреннюю признательность А. В. Горбатову, А. Г. Сабурову и В. М. Арапову за ценные замечания, сделанные ими при рецензировании рукописи.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

### ЛАБОРАТОРИЯ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Лабораторные работы по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств» проводят в специальной лаборатории, в которой представлены действующие аппараты, являющиеся основными для предприятий пищевой и химической промышленности (теплообменные аппараты, выпарные установки, ректификационные колонны, сушильные установки, циклоны, центрифуги, мешалки, отстойники, холодильные установки и др.), оснащенные современными контрольно-измерительными приборами и регулирующей аппаратурой.

Каждая установка снабжается плакатом с подробной схемой и пособиями, необходимыми для выполнения работы (таблицы водяного пара, психрометрическая таблица, диаграммы  $i-d$ ,  $T-S$ , кривые равновесия и т. д.).

В лаборатории желательно иметь специальные стенды для наглядной демонстрации основных запорных и регулирующих устройств, применяющихся в установках (разные типы вентиляей, кранов и т. п.), а также отдельные элементы установок в разобранном виде или с разрезами (конденсатоотводчики, сепараторы, калорифер и др.). Большинство установок питается водяным паром, поэтому желательно иметь при лаборатории специальную котельную. Для выполнения текущего ремонта оборудования необходима механическая мастерская.

На видном месте в лаборатории вывешивают общие правила техники безопасности работы в лаборатории, а у каждого рабочего места — правила техники безопасности работы на данной установке.

### СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА

Лабораторный практикум охватывает основные разделы курса «Процессы и аппараты пищевых производств» и включает 24 работы. На выполнение каждой работы требуется 4—6 ч. Обязательные для выполнения работы определяются специализацией

студентов и числом часов, отведенных на изучение курса по учебному плану.

Настоящий практикум позволяет выполнить лабораторные работы без предварительного прослушивания лекций (часто по учебному плану лабораторная работа проводится параллельно с лекциями или предшествует лекциям по соответствующим разделам курса). С этой целью в начале главы, в которой приведены работы, посвященные изучению определенного процесса и его вариантов, дается введение, в котором поясняются сущность и области применения процесса, а также излагаются основные теоретические положения и основы расчета, необходимые для выполнения работы.

Каждая лабораторная работа описана по единому плану: введение, цель работы, описание установки, методика проведения работы, обработка результатов испытания. Для записи экспериментальных и расчетных данных приводятся формы протоколов испытаний. В конце каждой работы даны материалы для управления познавательной деятельностью студентов.

## **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Студенту необходимо заблаговременно подготовиться к выполнению работы, изучив соответствующий материал по лекциям и учебникам, а также по лабораторному практикуму. При этом студент должен усвоить назначение, сущность и особенности изучаемого процесса; цель работы; физический смысл определяемых в работе показателей и их влияние на процесс; влияние режимных параметров на показатели; практические пути управления показателями в целях повышения интенсивности и экономичности изучаемого процесса; методику выполнения работы.

По схеме в практикуме или по схемам на плакатах в лаборатории студент должен разобраться в устройстве и работе установки, в назначении отдельных ее элементов, выяснить назначение, принцип работы и порядок подключения к установке контрольно-измерительных приборов и регулирующих устройств.

Вопросы, возникающие при самостоятельной подготовке к работе, студент должен выяснять у преподавателя. Он может заранее в лаборатории ознакомиться с установкой.

К занятиям студент выполняет в тетради схему установки с кратким описанием ее работы и форму протокола из практикума, поясняет смысл величин, подлежащих определению, их влияние на процесс.

В день занятий студент приходит в лабораторию на рабочее место и до опроса (в присутствии лаборанта) знакомится с установкой и выясняет возникшие у него вопросы у преподавателя.

Перед началом работы каждый студент подвергается опросу

преподавателем для выяснения степени его теоретической подготовки.

Студенты, допущенные к работе, приступают к ее выполнению в соответствии с методикой, изложенной в практикуме. Пуск установки (включение рубильников, электродвигателей, насосов, пуск пара и т. п.) разрешается только в присутствии преподавателя или лаборанта после проверки ими правильности проведения всей подготовительной работы.

Замеры всех необходимых параметров (величин) каждый студент в процессе работы записывает в подготовленный протокол. Со всеми вопросами, возникающими в процессе работы, студент должен сразу же обращаться к преподавателю.

При работе в лаборатории необходимо строго соблюдать правила техники безопасности. Без инструктажа по технике безопасности и проверки знаний студенты к выполнению работы не допускаются.

Не разрешается во время работы производить какие-либо переключения (операции) в установке, не предусмотренные методикой проведения испытания. Выключение установки (окончание работы) разрешается только после проверки преподавателем результатов испытания по протоколу.

По результатам проведенных замеров студент выполняет расчет необходимых по заданию величин.

По окончании работы студент дает преподавателю на подпись протокол испытания и выполненный расчет, приводит в порядок свое рабочее место. После этого при условии правильно проведенного испытания выполнение работы засчитывается.

На следующем занятии в лаборатории (или до него) студент сдает преподавателю оформленный отчет по выполненной работе. В отчете должны быть указаны цель работы, схема установки и краткое описание ее работы, физический смысл определяемых величин, подробный их расчет, необходимые графики, диаграммы, таблицы, проведен анализ полученных данных, подписанный преподавателем протокол испытания.

Отчет должен быть оформлен аккуратно, все схемы и графики выполнены четко. Без сдачи оформленного отчета по выполненной работе студент не допускается к выполнению очередной работы. Проверенный отчет по каждой работе возвращается студенту с пометкой «принято» или «на исправление».

Каждую лабораторную работу (по мере выполнения) студент защищает в течение семестра, а в конце семестра при успешной защите всех работ получает зачет по лабораторному практикуму. График выполнения и защиты лабораторных работ составляется и сообщается студентам в начале семестра в соответствии с календарным планом прохождения курса.

Основным пособием при изучении курса является учебник В. Н. Стабникова, В. М. Лысянского, В. Д. Попова и др. «Процессы и аппараты пищевых производств» (1985 г.).

## **СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

При выполнении лабораторной работы студент обязательно проводит прямое измерение каких-то параметров, используя соответствующие приборы или приспособления. Полученные результаты  $y_k$  будут отличаться от истинных значений измеряемых параметров  $y$  на величину абсолютной погрешности  $\Delta y_k$ :

$$\Delta y_k = y_k - y, \quad (1.1)$$

где  $y$  — истинная величина измеряемого параметра;  $k = 1 \div m$  — номер повторности измерения.

Появление абсолютных погрешностей связано с наличием приборной погрешности, величина которой определяется классом точности прибора, ошибками в действиях самих исследователей и влиянием случайных неучитываемых причин (факторов) на результат измерения.

При осуществлении прямого измерения возможна так называемая систематическая ошибка, связанная, например, с неправильной градуировкой прибора, неправильным положением оператора относительно прибора и т. д. Эту ошибку выявляют, проводя многократно эталонный опыт и вычисляя среднюю абсолютную погрешность. Она будет иметь определенный знак; на среднюю величину систематической ошибки изменяют полученные экспериментальные данные.

Ошибки экспериментатора могут недопустимо исказить оценку параметра. Такие ошибки называют грубыми. Результаты, обусловленные грубыми ошибками, выявляют и исключают из массива экспериментальных данных.

Влияние многих неучтенных факторов на результаты измерения полностью устранить невозможно. Иными словами, абсолютная погрешность прямого измерения после исключения грубых ошибок и систематической погрешности определяется суммарным действием большого числа составляющих погрешностей, каждая из которых имеет свою причину и свой закон распределения. Если принять, что эти составляющие равновероятны, то в соответствии с теоремой Ляпунова можно утверждать, что закон распределения абсолютных погрешностей прямого измерения  $\Delta y_k$  и, следовательно, результатов повторностей опыта  $y_k$  будет соответствовать нормальному закону.

Если какая-либо составляющая погрешности проявляется чаще других и ее влияние на результат опыта несоизмеримо

выше, чем влияние других составляющих, то нормальность закона распределения может быть нарушена.

Статистическая обработка данных, полученных студентами при выполнении лабораторных работ по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств», будет содержать лишь некоторые методы такой обработки.

**Определение оценок параметров закона распределения результата исследования  $\bar{y}$ ,  $S^2(y_k)$ ,  $A$ , и  $E$ .**

Среднеарифметическая оценка рассчитывается по всем  $m$  результатам повторностей опыта:

$$\bar{y} = 1/m \sum_{k=1}^m y_k. \quad (1.2)$$

Оценка дисперсии  $\sigma^2$  единичного результата рассчитывается по следующим формулам:

для эталонного процесса ( $f = m$ )

$$S^2(y_k) = \sum_{k=1}^m (y_k - \bar{y})^2 / m; \quad (1.3)$$

для исследуемого процесса ( $f = m - 1$ ) (рис. 1.1)

$$S^2(y_k) = \sum_{k=1}^m (y_k - \bar{y})^2 / (m - 1). \quad (1.4)$$

Если опыт осуществлен в одной повторности и результат получен прямым измерением (отсчетом) каким-либо прибором, то величину оценки дисперсии принято рассчитывать по соотношению

$$S^2(y_k) = (\Delta y_{\max})^2 / 3, \quad (1.5)$$

где  $\Delta y_{\max}$  — максимальная допустимая погрешность прибора, зависящая от класса точности  $K$  и предельного значения шкалы прибора  $N_{\text{пр}}$ .

$$\Delta y_{\max} = KN_{\text{пр}} / 100. \quad (1.6)$$

Однородные оценки дисперсии следует объединять, рассчитывая средневзвешенную оценку:

$$S^2(y_k) = \sum_{u=1}^N S^2(y_{ku}) f_u / \sum_{u=1}^N f_u, \quad (1.7)$$

где  $u = 1, \dots, N$  — номер опыта, по результатам  $m_u$  повторностей которого рассчитана оценка  $S^2(y_{ku})$  с числом степеней свободы  $f_u = m_u - 1$ ;  $\sum_{u=1}^N f_u = f$  — число степеней свободы средневзвешенной оценки дисперсии.

Однородность оценок дисперсии устанавливают либо по критерию Кохрена ( $f_u = \text{const}$ ), либо по критериям Бартлета или Фишера ( $f_u \neq \text{const}$ ).

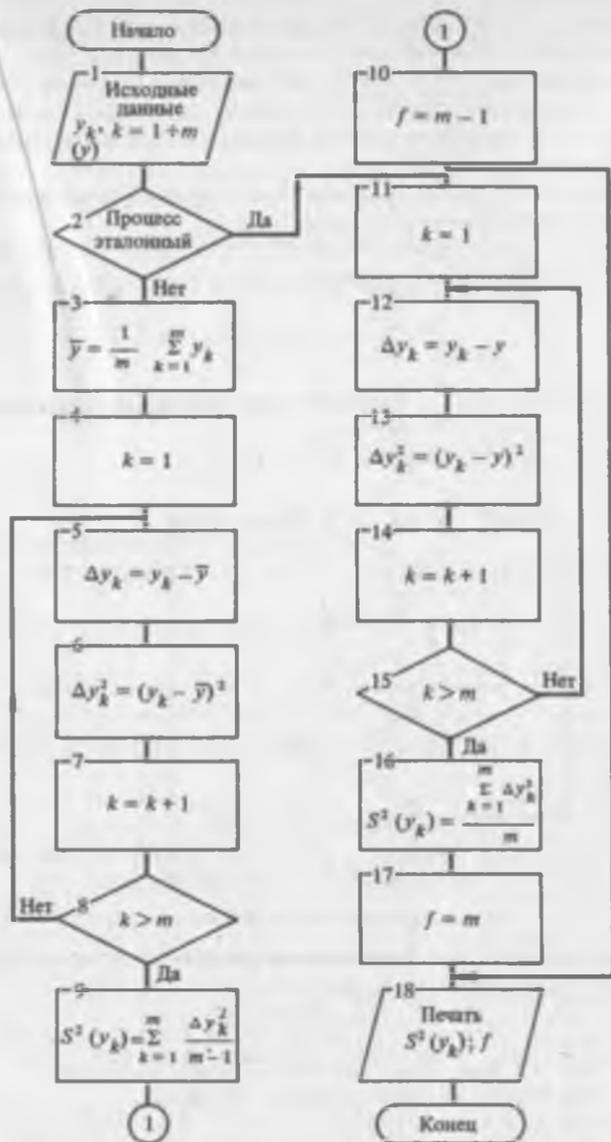


Рис. 1.1. Блок-схема алгоритма расчета экспериментальной оценки дисперсии единичного результата — модуль  $S^2(y_a)$

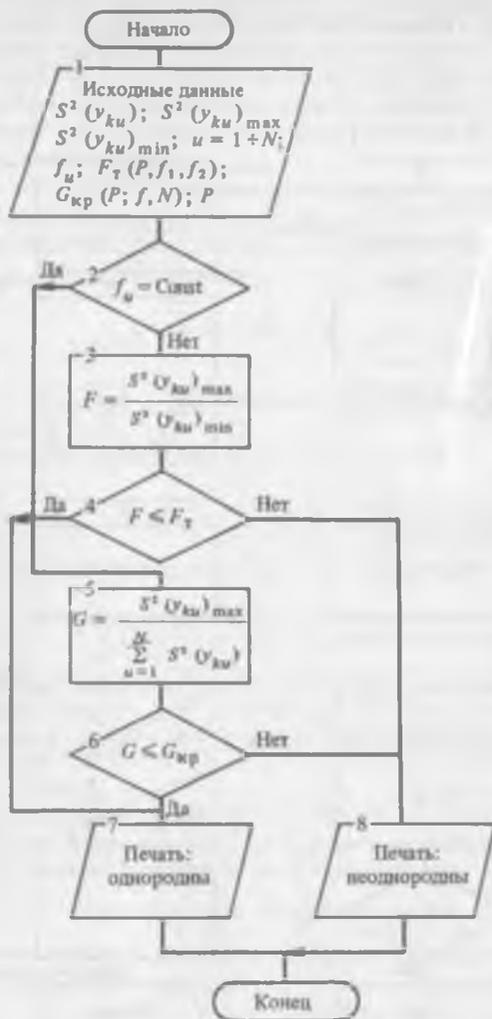


Рис. 1.2. Блок-схема алгоритма анализа однородности оценок дисперсии — модуль  $odn S^2(y_{ku})$

Блок-схема алгоритма такого анализа представлена на рис. 1.2.

Критерий Кохрена  $G_{кр}(P, N, f)$  берут из табл. 1 при заданной доверительной вероятности  $P$  (уровне значимости  $q = 1 - P$ ), числе оценок дисперсии  $N$  и числе степеней свободы любой из этих оценок  $f$ , критерий Фишера  $F_γ = (P, f_1, f_2)$  — из табл. 2

в зависимости от  $P$  и чисел степеней свободы  $f_1$  — максимальной дисперсии (числителя) и  $f_2$  — минимальной дисперсии (знаменателя). В исходных данных значатся таблицы величин критериев Кохрена и Фишера, а также выделены  $S^2(y_k)_{\max}$  и  $S^2(y_{ku})_{\min}$ . Выражение в блоке 3 называют F-отношением.

Оценку дисперсии среднего результата получают, основываясь на теореме о дисперсии среднего:

$$S^2(\bar{y}) = S^2(y_k)/m. \quad (1.8)$$

Оценка коэффициента асимметрии

$$A_s = \sum_{k=1}^m (y_k - \bar{y})^3 / m S^3(y_k). \quad (1.9)$$

Экспериментальная оценка эксцесса:

$$E_s = \sum_{k=1}^m (y_k - \bar{y})^4 / m S^4(y_k) - 3. \quad (1.10)$$

### 1. Значения критерия Кохрена $G_{\text{кр}}(P, N, f)$

N	f										
	1	2	3	4	5	6	8	16	36	144	$\infty$

Уровень значимости  $q = 0,05$

2	0,9985	0,9750	0,9392	0,9057	0,8772	0,8534	0,8159	0,7341	0,6602	0,5813	0,5000
3	0,9669	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6771	0,6333	0,5466	0,4748	0,4031	0,3333
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287	0,5895	0,5598	0,5175	0,4366	0,3720	0,3093	0,2500
5	0,8412	0,6838	0,5981	0,5441	0,5065	0,4783	0,4387	0,3645	0,3066	0,2513	0,2000
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,4184	0,3817	0,3135	0,2612	0,2119	0,1667
7	0,7271	0,5612	0,4800	0,4307	0,3974	0,3726	0,3384	0,2756	0,2278	0,1833	0,1429
8	0,6798	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,3362	0,3043	0,2462	0,2022	0,1616	0,1250
9	0,6385	0,4775	0,4027	0,3584	0,3286	0,3067	0,2768	0,2226	0,1820	0,1446	0,1111
10	0,6020	0,4450	0,3733	0,3311	0,3029	0,2823	0,2541	0,2032	0,1655	0,1308	0,1000
12	0,5410	0,3924	0,3264	0,2880	0,2624	0,2439	0,2187	0,1737	0,1403	0,1100	0,0833
15	0,4709	0,3346	0,2758	0,2419	0,2195	0,2034	0,1815	0,1429	0,1144	0,0889	0,0667
20	0,3894	0,2705	0,2205	0,1921	0,1735	0,1602	0,1422	0,1108	0,0879	0,0675	0,0500
30	0,2929	0,1980	0,1593	0,1377	0,1237	0,1137	0,1002	0,0771	0,0604	0,0457	0,0333
40	0,2370	0,1576	0,1259	0,1082	0,0968	0,0887	0,0780	0,0595	0,0462	0,0347	0,0250
60	0,1737	0,1131	0,0895	0,0765	0,0682	0,0623	0,0552	0,0411	0,0316	0,0234	0,0167
120	0,0998	0,0632	0,0495	0,0419	0,0371	0,0337	0,0292	0,0218	0,0165	0,0120	0,0083
$\infty$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Уровень значимости  $q = 0,01$

2	0,9999	0,9950	0,9794	0,9586	0,9373	0,9172	0,8823	0,7949	0,7067	0,6062	0,5000
3	0,9933	0,9423	0,8831	0,8335	0,7933	0,7606	0,7107	0,6059	0,5153	0,4230	0,3333
4	0,9676	0,8643	0,7814	0,7212	0,6761	0,6410	0,5897	0,4884	0,4057	0,3251	0,2500
5	0,9279	0,7885	0,6957	0,6329	0,5875	0,5531	0,5037	0,4094	0,3351	0,2644	0,2000
6	0,8828	0,7218	0,6258	0,5635	0,5195	0,4866	0,4401	0,3529	0,2858	0,2229	0,1667
7	0,8376	0,6644	0,5685	0,5080	0,4659	0,4347	0,3911	0,3105	0,2494	0,1929	0,1429
8	0,7945	0,6152	0,5209	0,4627	0,4226	0,3932	0,3522	0,2779	0,2214	0,1700	0,1250
9	0,7544	0,5727	0,4810	0,4251	0,3870	0,3592	0,3207	0,2514	0,1992	0,1521	0,1111
10	0,7175	0,5358	0,4469	0,3934	0,3572	0,3308	0,2945	0,2297	0,1811	0,1376	0,1000
12	0,6528	0,4751	0,3919	0,3428	0,3099	0,2861	0,2535	0,1961	0,1535	0,1157	0,0833

N	F										
	1	2	3	4	5	6	8	16	36	144	$\infty$
15	0,5747	0,4069	0,3317	0,2882	0,2593	0,2386	0,2104	0,1612	0,1251	0,0934	0,0667
20	0,4799	0,3297	0,2654	0,2288	0,2048	0,1877	0,1646	0,1248	0,0960	0,0709	0,0500
30	0,3632	0,2412	0,1913	0,1635	0,1454	0,1327	0,1157	0,0867	0,0658	0,0480	0,0333
40	0,2940	0,1915	0,1508	0,1281	0,1135	0,1033	0,0898	0,0668	0,0503	0,0363	0,0250
60	0,1371	0,1251	0,1069	0,0902	0,0796	0,0722	0,0625	0,0461	0,0344	0,0245	0,0167
120	0,1225	0,0759	0,0585	0,0489	0,0429	0,0387	0,0334	0,0242	0,0178	0,0125	0,0083
$\infty$	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000

2. Значения критерия Фишера  $F(P, f_1, f_2)$ 

$f_2$	$f_1$									
	1	2	3	4	5	6	12	24	$\infty$	

Уровень значимости  $q = 0,05$ 

1	164,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	244,9	249,0	254,3
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0	4,7	4,5	4,4
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,0	3,8	3,7
7	5,6	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	2,9	2,7
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5
11	4,8	4,0	3,6	3,4	3,2	3,1	2,8	2,6	2,4
12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1	3,0	2,7	2,5	2,3
13	4,7	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9	2,6	2,4	2,2
14	4,6	3,7	3,3	3,1	3,0	2,9	2,5	2,3	2,1
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1
20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,8
30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5	2,4	2,1	1,9	1,6
40	4,1	3,2	2,9	2,6	2,5	2,3	2,0	1,8	1,5
60	4,0	3,2	2,8	2,5	2,4	2,3	1,9	1,7	1,4
120	3,9	3,1	2,7	2,5	2,3	2,2	1,8	1,6	1,3
$\infty$	3,8	3,0	2,6	2,4	2,2	2,1	1,8	1,5	1,0

Уровень значимости  $q = 0,01$ 

1	4052	4999	5403	5625	5764	5859	6106	6234	6366
2	98,5	99,0	99,2	99,3	99,3	99,4	99,4	99,5	99,5
3	34,1	30,8	29,5	28,7	28,2	27,9	27,1	26,6	26,1
4	21,2	18,0	16,7	16,0	15,5	15,2	14,4	13,9	13,5
5	16,3	13,3	12,1	11,4	11,0	10,7	9,9	9,5	9,0
6	13,7	10,9	9,8	9,2	8,8	8,5	7,7	7,3	6,9
7	12,3	9,6	8,5	7,9	7,5	7,2	6,5	6,1	5,7
8	11,3	8,7	7,6	7,0	6,6	6,4	5,7	5,3	4,9
9	10,6	8,0	7,0	6,4	6,1	5,8	5,1	4,7	4,3

$f_2$	$f_1$								
	1	2	3	4	5	6	12	24	$\infty$
10	10,0	7,6	6,6	6,0	5,6	5,4	4,7	4,3	3,9
11	9,7	7,2	6,2	5,7	5,3	5,1	4,4	4,0	3,6
12	9,3	6,9	6,0	5,4	5,1	4,8	4,2	3,8	3,4
13	9,1	6,7	5,7	5,2	4,9	5,6	4,0	3,6	3,2
14	8,9	6,5	5,6	5,0	4,7	4,5	3,8	3,4	3,0
15	8,7	6,4	5,4	4,9	4,6	4,3	3,7	3,3	2,9
20	8,1	5,9	4,9	4,4	4,1	3,9	3,2	2,9	2,4
30	7,6	5,4	4,5	4,0	3,7	3,5	2,8	2,5	2,0
40	7,3	5,2	4,3	3,8	3,5	3,3	2,7	2,3	1,8
60	7,1	5,0	4,1	3,7	3,3	3,1	2,5	2,1	1,6
120	6,9	4,8	4,0	3,5	3,2	3,0	2,3	2,0	1,4
$\infty$	6,6	4,6	3,8	3,3	3,0	2,8	2,2	1,8	1,0

Параметры  $A$ , и  $E$ , являются случайными величинами, не подчиняющимися нормальному закону распределения. Если абсолютные отклонения экспериментальных оценок  $A$ , и  $E$ , от теоретических (например, для нормального распределения  $A_T = 0$  и  $E_T = 0$ ) значимы, то распределение отличается от предполагаемого теоретического.

Если  $A, > 0$ , то имеет место положительная асимметрия (правоскошенное распределение);  $A, < 0$  — отрицательная асимметрия (левоскошенное распределение);  $A, = 0$  — симметричное распределение.

Если  $E, > 0$  — островершинное распределение;  $E, < 0$  — плосковершинное распределение;  $E, = 0$  — высота кривой соответствует высоте кривой нормального распределения.

Существуют критерии, по которым можно оценить значимость отличия закона распределения от предполагаемого теоретического, например критерии Пирсона  $\chi$  (хи-квадрат), Колмогорова и др. Использование этих критериев предполагает предварительное выравнивание эмпирического распределения по теоретическому.

**Исключение грубых ошибок.** Если есть уверенность в том, что измеренная случайная величина подчиняется нормальному закону распределения, то для определения грубых ошибок следует использовать критерий максимального отклонения  $r_{\max}$ :

$$1) \quad r = |\Delta y_k|_{\max} \sqrt{\frac{m}{m-1}} / S(y_k); \quad (1.11)$$

2) по табл. 3 определяют  $r_{\max} = f(P, m)$ ;

3) если  $r_{\max} < r$ , то соответствующий результат следует исключить как ошибочный, пересчитать  $y$  и  $S^2(y_k)$  и убедиться, что больше ошибочных результатов в массиве нет (рис. 1.3).

гнозировании данная запись позволяет утверждать, что при повторном осуществлении опыта  $m$  раз полученный средний результат  $\bar{y}$  с вероятностью  $P$  будет лежать в этом интервале.

Если число степеней свободы, при котором получена оценка дисперсии  $S^2(y_k)$ , так велико, что дальнейшее его увеличение не приводит к значимому уточнению оценки дисперсии, то принимают  $S^2(y_k) = \sigma^2$  и для определения доверительной ошибки пользуются «правилом сигм»:  $e(\bar{y}) = t(P)\sigma/\sqrt{m}$ ,

$$\text{при } P = 0,68 \quad e(\bar{y}) = \sigma/\sqrt{m}; \quad (1.14)$$

$$\text{при } P = 0,95 \quad e(\bar{y}) = 2\sigma/\sqrt{m}; \quad (1.15)$$

$$\text{при } P = 0,998 \quad e(\bar{y}) = 3\sigma/\sqrt{m}. \quad (1.16)$$

Если  $S^2(y_k)$  имеет конечное число степеней свободы, то для расчета доверительной ошибки применяют критерий Стьюдента  $t(P, f)$ :

$$e(\bar{y}) = t(P, f)S(y_k)/\sqrt{m}. \quad (1.17)$$

### 5. Значения критерия Стьюдента $t(P, f)$

$f$	Уровень значимости $q$		$f$	Уровень значимости $q$	
	0,05	0,01		0,05	0,01
1	12,71	63,66	11	2,20	3,11
2	4,30	9,93	12	2,18	3,06
3	3,18	5,84	13	2,16	3,01
4	2,78	4,60	14	2,15	2,98
5	2,57	4,03	30	2,04	2,75
6	2,45	3,71	40	2,02	2,70
7	2,37	3,50	60	2,00	2,66
8	2,31	3,36	120	1,98	2,62
9	2,26	3,25	$\infty$	1,96	2,58
10	2,23	3,17			

Критерий Стьюдента берут из табл. 5.

На рис. 1.4 изображена блок-схема определения доверительной ошибки  $e(y)$ .

Если требуется прогнозировать величину результата единичного опыта  $y_k$ , то запись должна быть такой:

$$|y_{k\min} - e(y_k)| < y < |y_{k\max} + e(y_k)|, \quad (1.18)$$

где  $e(y_k)$  — доверительная ошибка единичного результата:

$$\text{при } f = \infty \quad e(y_k) = t(P)\sigma; \quad (1.19)$$

$$\text{при } f \text{ конечном } e(y_k) = t(P, f)S(y_k); \quad (1.20)$$

$y_{k\min}, y_{k\max}$  — результаты повторностей ранее осуществленного опыта.

Рис. 1.4 Блок-схема алгоритма расчета доверительной ошибки среднеарифметического результата — модуль  $t(\bar{y})$

**Расчет дисперсии и доверительной ошибки функций.** Если по результатам  $y$ , прямых измерений рассчитывают какой-либо параметр (функцию)  $z$ , то его дисперсия в соответствии с законом накопления ошибок

$$S^2(z) = \sum_{i=1}^n (\partial z / \partial y_i)^2 S^2(\bar{y}_i), \quad (1.21)$$

где  $i = 1, \dots, n$  — номер измеренного параметра;  $S^2(\bar{y}_i)$  — оценка дисперсий результатов измерений соответствующих параметров  $y$ , с одинаковым числом степеней свободы  $f$ .

Предположим, что нужно оценить дисперсию площади  $F$  круглого отверстия, диаметр которого измеряется с дисперсией  $S^2(d_k)$ .

$$\begin{aligned} F = z &= \frac{\pi d^2}{4}; \quad S^2(F_k) = [dF/d(d)]^2 S^2(d_k) = \\ &= [d(\pi d^2/4)/d(d)]^2 S^2(d_k) = [(\pi/4)2d]^2 S^2(d_k) = \\ &= \pi^2 d^2 S^2(d_k)/4. \end{aligned} \quad (1.22)$$

Оценку дисперсии полного напора насоса, рассчитанного по формуле

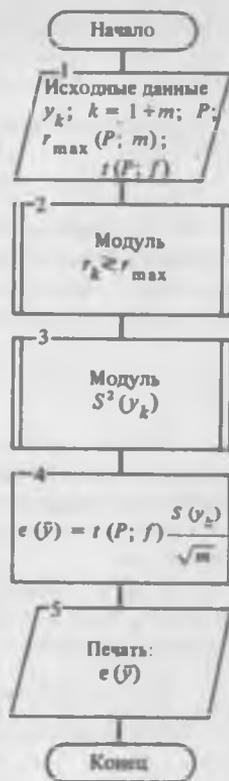
$$H = (h_2 - h_1) + (p_2 - p_1)/\rho g, \quad (1.23)$$

где  $h_2$  и  $h_1$  — высоты, измеренные с дисперсией  $S^2(h_k)$ ;  $p_2$  и  $p_1$  — давления, измеренные с дисперсией  $S^2(p_k)$ , получают, используя закон накопления ошибок:

$$\begin{aligned} S^2(H_k) &= (\partial H / \partial h_1)^2 S^2(h_{1k}) + (\partial H / \partial h_2)^2 S^2(h_{2k}) + (\partial H / \partial p_1)^2 S^2(p_{1k}) + \\ &+ (\partial H / \partial p_2)^2 S^2(p_{2k}) = 2[S^2(h_k) + S^2(p_k)/\rho^2 g^2]. \end{aligned} \quad (1.24)$$

В случае оценки дисперсии площади отверстия  $F$  дисперсия функции зависит от величины самой функции, что свидетельствует о невозможности нормальный закон распределения результатов измерения диаметра  $d_k$  распространить на функцию — площадь круга  $F$ . Доверительную ошибку площади с помощью критерия Стьюдента или параметра  $t(P)$  рассчитать нельзя.

Доверительный интервал при  $P = 0,95$  случайных величин, не подчиняющихся нормальному закону распределения, можно приближенно оценить, используя неравенство Чебышева:



для любого распределения

$$[\bar{y} - 4,46S(y_k)/\sqrt{m}] \leq y \leq [\bar{y} + 4,46S(y_k)/\sqrt{m}]; \quad (1.25)$$

для симметричного распределения

$$[\bar{y} - 2,96S(y_k)/\sqrt{m}] \leq y \leq [\bar{y} + 2,96S(y_k)/\sqrt{m}]. \quad (1.26)$$

В случае оценки дисперсии полного напора  $H$  дисперсия функции не зависит от величины функции. Следовательно, нормальный закон распределения результатов  $h_k$  и  $p_k$  распространяется на случайную величину  $H_k$ . Тогда

$$H = H_k \pm t(P, f)S(H_k), \text{ или}$$

$$H = \bar{H} \pm t(P, f)S(H_k)/\sqrt{m}.$$

**Анализ значимости различия средних результатов опытов (анализ однородности средних).** При анализе полученных экспериментальных данных часто приходится их сравнивать, выявляя условия, способствующие повышению эффективности изучаемого процесса.

Отдать предпочтение одному из сравниваемых результатов можно лишь в том случае, если разность между ними будет превышать величину доверительной ошибки разности:

$$|\bar{y}_I - \bar{y}_{II}| > e(\bar{y}_I - \bar{y}_{II}). \quad (1.27)$$

Для нормального закона распределения:

$$e(\bar{y}_I - \bar{y}_{II}) = t(P, f)S(\bar{y}_I - \bar{y}_{II}). \quad (1.28)$$

В соответствии с законом накопления ошибок

$$S^2(\bar{y}_I - \bar{y}_{II}) = S^2(\bar{y}_I) + S^2(\bar{y}_{II}) = S^2(y_{mI})/m_I + S^2(y_{mII})/m_{II}.$$

Если сравнивают результаты, полученные на разных аппаратах, разных заводах или в разных лабораториях, следует убедиться в однородности оценок дисперсии, что будет свидетельствовать об одинаковых условиях получения результатов (квалификация персонала, приборное оснащение и т. д.) и одинаковой стабильности работы аппаратов. Если оценки дисперсии однородны, то

$$S^2(\bar{y}_I - \bar{y}_{II}) = S^2(\bar{y}_k)(1/m_I + 1/m_{II}),$$

где

$$S^2(y_k) = [S^2(y_{kI})f_I + S^2(y_{kII})f_{II}]/(f_I + f_{II}).$$

Число степеней свободы средневзвешенной оценки  $S^2(y_k)$  и, следовательно,  $S^2(\bar{y}_I - \bar{y}_{II})$  равно сумме  $f_I$  и  $f_{II}$ , т. е.  $f = f_I + f_{II}$ .

Если оценки дисперсии неоднородны, то сравнивать результаты  $\bar{y}_1$  и  $\bar{y}_{11}$ , утверждая преимущество одного из них перед другим, статистическими методами нельзя. Сравнимые оценки  $\bar{y}_1$  и  $\bar{y}_{11}$  будут однородны, если

$$(\bar{y}_1 - \bar{y}_{11}) < e(\bar{y}_1 - \bar{y}_{11}). \quad (1.29)$$

При такой ситуации с заданной вероятностью  $P$  говорить о большей эффективности какого-либо аппарата, процесса нельзя. Блок-схема алгоритма анализа однородности двух средних изображена на рис. 1.5.

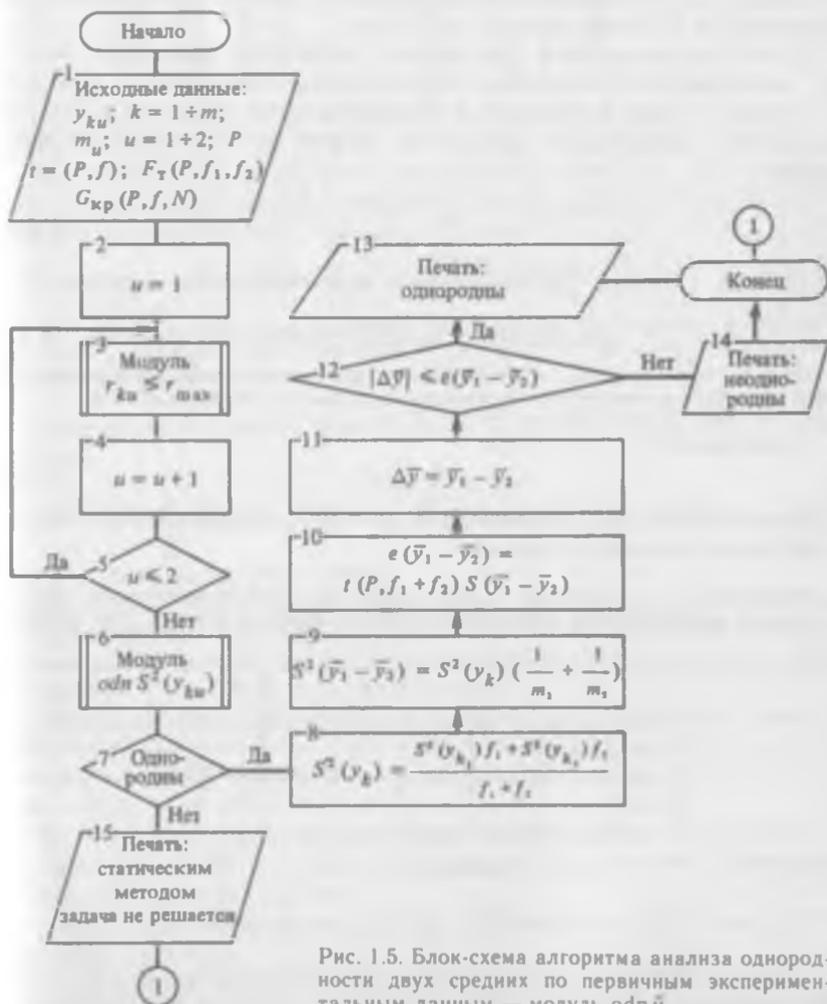


Рис. 1.5. Блок-схема алгоритма анализа однородности двух средних по первичным экспериментальным данным — модуль одн  $\bar{y}$

Определение оценок коэффициентов аппроксимирующих зависимостей и проверка их адекватности экспериментальным данным. Определение коэффициентов эмпирических уравнений при нормальном (вообще симметричном) законе распределения экспериментальных данных осуществляют методом наименьших квадратов после определения степени искомого уравнения анализом расположения опытных точек на поле  $y = f(c)$  или  $y = \varphi(x)$ . Здесь  $c$  — значение исследуемого фактора в натуральной размерности;  $x = (c - c_0)/\lambda$  — значение исследуемого фактора в безразмерном выражении;  $c_0 = (c_{\max} + c_{\min})/2$  — центр эксперимента;  $\lambda = c_{n+1} - c_n$  — интервал варьирования фактора, величина постоянная;  $n$  — номер опыта;  $c_{n+1} > c_n$ .

Если при известном диапазоне изменения факторов  $c_{\max}$  и  $c_{\min}$  запланировать нечетное число опытов, например  $N = 7$  при  $\lambda = \text{const}$ , то для определения коэффициентов уравнения  $y = f(x)$  по методу наименьших квадратов можно воспользоваться формулой

$$b_j = \sum_{u=1}^N a_{ju} \bar{y}_u / d_j, \quad (1.30)$$

где  $j = 0, \dots, l$  — индекс  $j$ -го коэффициента в полиномиальном уравнении

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + \dots; \quad (1.31)$$

$l$  — степень уравнения;  $a_{ju}$ ,  $d_j$  — множители для числителя и знаменатель, берутся из табл. 6 в зависимости от степени полинома  $l$  и числа опытов  $N$ .

### Зависимость

$$y = f(c) \quad (1.32)$$

получают после подстановки  $x = (c - c_0)/\lambda$  в уравнение (1.31) и подведения подобных членов.

6. Множители  $a_{ju}$  и знаменатель  $d_j$  для определения методом наименьших квадратов оценок коэффициентов аппроксимирующего полинома степени  $l$  по формуле (1.30)

$y_u$	$l$	1		2			3			
	$d_j$	5	10	35	10	14	35	12	14	12
	$a_{ju}$	$a_{0u}$	$a_{1u}$	$a_{2u}$	$a_{1u}$	$a_{2u}$	$a_{0u}$	$a_{1u}$	$a_{2u}$	$a_{3u}$

Число опытов  $N = 5$

$y_1$	1	-2	-3	-2	2	-3	1	2	-1
$y_2$	1	-1	12	-1	-1	12	-8	-1	2
$y_3$	1	0	17	0	-2	17	0	-2	0
$y_4$	1	1	12	1	-1	12	8	-1	-2
$y_5$	1	2	-3	2	2	-3	-1	2	1

у <sub>и</sub>	l	1			2			3			4				
	d <sub>i</sub>	7	28	21	28	84	21	252	84	36	231	252	264	36	364
	a <sub>1и</sub>	a <sub>0и</sub>	a <sub>1и</sub>	a <sub>0и</sub>	a <sub>1и</sub>	a <sub>2и</sub>	a <sub>0и</sub>	a <sub>1и</sub>	a <sub>2и</sub>	a <sub>3и</sub>	a <sub>0и</sub>	a <sub>1и</sub>	a <sub>2и</sub>	a <sub>3и</sub>	a <sub>4и</sub>

Число опытов  $N = 7$ 

y <sub>1</sub>	1	-3	-2	-3	5	-2	22	5	-1	5	22	-13	-1	3
y <sub>2</sub>	1	-2	3	-2	0	3	-67	0	1	-30	-67	67	1	-7
y <sub>3</sub>	1	-1	6	-1	-3	6	-58	-3	1	75	-58	-19	1	1
y <sub>4</sub>	1	0	7	0	-4	7	0	-4	0	131	0	-70	0	6
y <sub>5</sub>	1	1	6	1	-3	6	58	-3	-1	75	58	-19	-1	1
y <sub>6</sub>	1	2	3	2	0	3	67	0	-1	-30	67	67	-1	-7
y <sub>7</sub>	1	3	-2	3	5	-2	-22	5	1	5	-22	-13	1	3

Неточность предсказания результатов опыта  $\bar{y}_u$ , по которым были рассчитаны оценки коэффициентов  $b_j$ , характеризуется дисперсией адекватности:

$$S_{ад}^2 = \sum_{u=1}^k (\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2 / (N - N'), \quad (1.33)$$

где  $\hat{y}_u$  — предсказанный по уравнению (1.31) или (1.32) результат  $u$ -го опыта;  $N'$  — число коэффициентов уравнения,  $N' = l + 1$ ;  $N - N' = f_{ад}$  — число степеней свободы дисперсии адекватности.

Экспериментальные данные  $\bar{y}_u = \sum_{k=1}^m y_{ku} / m$  получены с дисперсией

$$S^2(\bar{y}) = \sum_{u=1}^N S^2(y_{ku}) / Nm = \sum_{u=1}^N \sum_{k=1}^m (y_{ku} - \bar{y}_u)^2 / (m-1)Nm \quad (1.34)$$

при  $f = N(m-1)$ ;  $m = \text{const}$ .

Уравнение будет адекватным, если неточность описания экспериментальных данных полученным уравнением будет соответствовать неточности самих экспериментальных данных, т. е. если дисперсии  $S_{ад}^2$  и  $S^2(\bar{y})$  будут однородны.

Однородность дисперсий проверяют по критерию Фишера  $F_r(P, f_1, f_2)$ :

$$a) F = S_{ад}^2 / S^2(\bar{y}) > 1, f_1 = f_{ад} \text{ и } f_2 = N(m-1)$$

или

$$б) F = S^2(\bar{y}) / S_{ад}^2 > 1, f_1 = N(m-1) \text{ и } f_2 = f_{ад}.$$

Если  $F > F_r(P, f_1, f_2)$ , уравнение неадекватно описывает экспериментальные данные:

а) недостаточно точно и надо переходить к полиному более высокой степени;

б) излишне точно и надо попытаться, уменьшив степень полинома, получить уравнение меньшей степени, достоверно отра-

строго соблюдать Правила эксплуатации котельных установок, утвержденные Госгортехнадзором СССР 30 августа 1966 г. В частности, соблюдать установленный порядок, по которому все котлы и сосуды, работающие под избыточным давлением свыше 70 кПа, должны быть зарегистрированы в соответствующих органах Котлонадзора и без разрешения инспекции Котлонадзора не могут быть пушены в эксплуатацию (Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, утвержденные Госгортехнадзором 19 мая 1970 г.). Вся арматура и измерительная аппаратура (питающие приборы, водомерные приборы, манометры, предохранительные клапаны и др.) должны содержаться в надлежащем порядке и периодически подвергаться проверке.

При использовании компрессорных установок необходимо обеспечить выполнение Правил по технике безопасности на аммиачных холодильных установках, утвержденных президиумом ЦК профсоюза рабочих пищевой промышленности 5 мая 1967 г. и ЦК профсоюза работников государственной торговли и потребительской кооперации 8 июня 1967 г., а также Правил техники безопасности на фреоновых холодильных установках, утвержденных президиумом ЦК профсоюза работников государственной торговли и потребительской кооперации 4 апреля 1967 г.

С особым вниманием необходимо отнестись к соблюдению установленных правил окраски линии, к проверке манометров и клапанов, всей арматуры и установки в целом. Соединения трубопроводов должны быть уплотнены и не пропускать газа. В случае проникновения газа в помещение следует немедленно проветрить помещение и ликвидировать пропуск газа.

Все виды передач (зубчатые, ременные и др.) надежно ограждают в соответствии с требованиями охраны труда, действующими на промышленных предприятиях и утвержденными ЦК профсоюза рабочих пищевой промышленности для предприятий пищевой промышленности.

За устройством и состоянием ограждения устанавливают наблюдение, не допуская работу механизмов без ограждений. Ограждения должны быть из прочного материала с соответствующим креплением, позволяющим без особых затруднений установить их.

В лабораторных условиях следует шире применять новейшие виды автоблокировки, фотореле и другие приспособления, позволяющие мгновенно остановить вращающиеся и другие движущиеся части при появлении опасности. Студенты обязаны пользоваться соответствующей спецодеждой и средствами индивидуальной защиты (рукавицы, защитные очки и пр.).

Особое внимание необходимо уделять вопросам электробезопасности. Все электроустановки и токоприемники следует

заземлить, электропроводку (силовую и осветительную) нужно содержать в технически исправном состоянии.

Монтаж и эксплуатацию электроустановок осуществляют в соответствии с Правилами эксплуатации электроустановок, Правилами техники безопасности при эксплуатации электротехнических установок промышленных предприятий, Противопожарными нормами строительного проектирования промышленных предприятий и населенных мест.

При эксплуатации электроустановок в лаборатории необходимо обеспечить отличительную окраску сетей (ограждения) согласно действующим правилам; защиту сетей от механических повреждений; защиту от случайного приближения и прикосновения к механизмам. У рабочих мест вывешивают плакаты и надписи по технике безопасности по обслуживанию электроустановок, студенты обеспечиваются средствами индивидуальной защиты. При работе в лаборатории необходимо соблюдать правила техники безопасности в соответствии с ГОСТ 12.4.113—82, ССБТ «Работы учебные, лабораторные. Общие требования безопасности».

В лабораториях, где студенты работают с электроприборами и электроустановками, наблюдение за этими приборами и установками возлагают на лицо, ответственное за электротехнические устройства.

Контроль за выполнением правил техники безопасности в лаборатории осуществляет заведующий лабораторией или специально выделенный работник по технике безопасности.

### ПРОЦЕСС ТЕПЛООБМЕНА

На пищевых предприятиях одним из наиболее распространенных процессов является тепловая обработка продуктов. В зависимости от характера и цели процесса тепловая обработка должна обеспечивать поддержание температуры продукта на определенном уровне, нагревание холодного или охлаждение горячего продукта, замораживание продукта и т. п. Все эти процессы связаны с передачей теплоты обрабатываемому продукту (веществу) или отнятием от него теплоты, т. е. с теплообменом.

Аппараты, основным назначением которых является теплообмен между веществами, называют теплообменными.

Целью проверочного расчета теплообменного аппарата является определение режима работы, а также показателей интенсивности и экономичности процесса теплообмена по данным испытаний, т. е. определение температуры теплоносителей, коэффициента теплопередачи, потерь давления теплоносителей, потерь теплоты в окружающую среду.

Основными расчетными уравнениями являются уравнение теплового баланса и уравнение теплопередачи.

**Уравнение теплового баланса.** При работе теплообменных аппаратов в результате теплообмена происходит уменьшение энтальпии горячего теплоносителя (теплоотдатчика) и повышение энтальпии холодного теплоносителя (теплоприемника).

Методика определения количества отданной и поглощенной теплоты (тепловой нагрузки аппарата) зависит от агрегатного состояния теплоносителей.

При нагревании и охлаждении без изменения агрегатного состояния теплоносителя, если таковым является жидкость или газ, уравнение теплового баланса имеет вид:

для непрерывных процессов

$$Q = G_1 c_1 (t_1 - t_1') = G_2 c_2 (t_2' - t_2) + Q_{\text{пот}}; \quad (2.1)$$

для периодических процессов

$$Q' = G_1' c_1 (t_1 - t_1') = G_2' c_2 (t_2' - t_2) + Q_{\text{пот}}', \quad (2.2)$$

где  $G_1, G_2, G_1', G_2'$  — количество горячего и холодного теплоносителей, проходящих через аппарат за единицу времени (в кг/с) и за время процесса (в кг);  $c_1$  и  $c_2$  — удельная теплоемкость горячего и холодного теплоносителей, Дж/(кг·К);  $t^h$  и  $t^k$  — начальная и конечная температура горячего теплоносителя, °С;  $t_1^h$  и  $t_1^k$  — начальная и конечная температура холодного теплоносителя, °С;  $Q_{\text{пот}}$  и  $Q_{\text{пот}}^*$  — потери теплоты в окружающую среду за единицу времени (в Вт) и за весь процесс (в Дж).

При нагревании жидкости или газа сухим насыщенным паром с изменением агрегатного состояния горячего теплоносителя уравнение теплового баланса имеет вид:

для непрерывных процессов

$$Q = Dr + Dc_{\text{конд}}(t_p - \theta_{\text{конд}}) = G_2 c_2 (t_2^h - t_2^k) + Q_{\text{пот}}, \quad (2.3)$$

или

$$Q = D(i_p - c_{\text{конд}} \theta_{\text{конд}}) = G_2 c_2 (t_2^h - t_2^k) + Q_{\text{пот}};$$

для периодических процессов

$$Q^* = D^* r + D^* c_{\text{конд}}(t_p - \theta_{\text{конд}}) = G_2^* c_2 (t_2^h - t_2^k) + Q_{\text{пот}}^*, \quad (2.4)$$

или

$$Q^* = D^*(i_p - c_{\text{конд}} \theta_{\text{конд}}) = G_2^* c_2 (t_2^h - t_2^k) + Q_{\text{пот}}^*,$$

где  $D$  и  $D^*$  — количество пара, прошедшего через аппарат в единицу времени (в кг/с) и за весь процесс (в кг);  $r$  — удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $t_p$  — температура пара, поступающего в аппарат, °С;  $\theta_{\text{конд}}$  — температура конденсата, выходящего из аппарата, °С;  $i_p$  — удельная энтальпия пара, Дж/кг;  $c_{\text{конд}}$  — удельная теплоемкость конденсата, Дж/(кг·К).

**Уравнение теплопередачи.** Основное уравнение теплопередачи имеет вид:

$$Q = kF\Delta t_{\text{ср}}, \quad (2.5)$$

где  $Q$  — количество теплоты, переданное от одного теплоносителя к другому (в Вт) (определяется из уравнения теплового баланса);  $k$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  — площадь поверхности нагрева аппарата, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{\text{ср}}$  — средний температурный напор, К.

Для периодических процессов, протекающих за определенное время, уравнение теплопередачи имеет вид:

$$Q^* = kF\Delta t_{\text{ср}} \tau, \quad (2.6)$$

где  $Q^*$  — количество теплоты, переданное от одного теплоносителя к другому в течение процесса, Дж;  $\tau$  — продолжительность процесса, ч или с.

Из уравнений (2.5) и (2.6) видно, чем больше значение  $k$  при тех же значениях  $Q$ ,  $\Delta t_{\text{ср}}$ ,  $\tau$ , тем с меньшей площадью поверхности нагрева может быть спроектирован аппарат, тем меньше его габаритные размеры, масса и стоимость.

При работе аппарата с определенной поверхностью нагрева чем больше значение  $k$ , тем интенсивнее процесс теплообмена,

т. е. большее количество теплоты передается от горячего теплоносителя к холодному. Следовательно, быстрее нагревается определенное количество холодного теплоносителя до заданной температуры или за то же время холодный теплоноситель нагреется до более высокой температуры.

**Коэффициент теплопередачи.** Коэффициент теплопередачи  $k$  является основной величиной, характеризующей интенсивность работы теплообменных аппаратов. Практическое значение коэффициента теплопередачи определяют из основного уравнения теплопередачи:

$$k_{\text{практ}} = Q/F\Delta t_{\text{ср.}}$$

Расчетное значение коэффициента теплопередачи определяют по следующим формулам: для плоской стенки

$$k_{\text{расч}} = 1/(1/\alpha_1 + \sum(\delta/\lambda + 1/\alpha_2); \quad (2.7)$$

для цилиндрической стенки (труба при  $d_2/d_1 < 0,5$ )

$$k_{l\text{расч}} = \pi/[1/(\alpha_1 d_1) + (1/2\lambda_{\text{ст}})2,31g(d_1/d_2) + 1/(\alpha_2 d_2)], \quad (2.8)$$

где  $\alpha_1$  — коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности нагрева, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_2$  — коэффициент теплоотдачи от поверхности нагрева к холодному теплоносителю, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta$  — толщина стенки ( $\delta_{\text{ст}}$ ) и слоя накипи или ржавчины на ней ( $\delta_{\text{нак}}$ ), м;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала поверхности нагрева ( $\lambda_{\text{ст}}$ ) и слоя накипи ( $\lambda_{\text{нак}}$ ), Вт/(м·К);  $d_1$  и  $d_2$  — диаметр трубы со стороны горячего и холодного теплоносителей, м.

Интенсивность теплоотдачи зависит от свойств теплоносителей и характера их движения; в соответствии с этим методика определения коэффициента теплоотдачи различна.

1. Если теплоотдача происходит без изменения агрегатного состояния теплоносителя (жидкость или газ) при вынужденном (принудительном) его движении, коэффициент теплоотдачи определяют из критериального уравнения, имеющего общий вид

$$Nu = f(\text{RePrGr}). \quad (2.9)$$

Для расчета выбирают критериальное уравнение в зависимости от режима движения теплоносителя в аппарате. Для теплоносителя внутри прямых вертикальных труб:

при ламинарном режиме ( $\text{Re} \leq 2320$ )

$$Nu = 0,7(\text{RePr})^{0,2}(\text{GrPr})^{0,1}; \quad (2.10)$$

при переходном режиме ( $2320 < \text{Re} < 10\,000$ )

$$Nu = 0,008\text{Re}^{0,9}\text{Pr}^{0,43}; \quad (2.11)$$

при турбулентном режиме ( $\text{Re} > 10\,000$ )

$$Nu = 0,023\text{Re}^{0,8}\text{Pr}^{0,4}. \quad (2.12)$$

Критерий Рейнольдса  $Re$  характеризует режим движения теплоносителя:

$$Re = vd_{эк}/\nu = vd_{эк}\rho/\mu, \quad (2.13)$$

где  $v$  — скорость движения теплоносителя в аппарате, м/с;  $d_{эк}$  — эквивалентный диаметр потока теплоносителя, м (если теплоноситель протекает внутри трубы, то  $d_{эк} = d_{вн}$ );  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости теплоносителя, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  — плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Критерий Прандтля  $Pr$  характеризует физические свойства теплоносителя:

$$Pr = c\mu/\lambda = c\nu\rho/\lambda, \quad (2.14)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·К).

Критерий Грасгофа  $Gr$  характеризует режим движения теплоносителя при свободной конвекции:

$$Gr = (gd_{вн}^3/\nu^2)\beta\Delta t, \quad (2.15)$$

где  $\beta$  — коэффициент объемного расширения теплоносителя, 1/К;  $\Delta t$  — разность между температурой поверхности нагрева со стороны холодного теплоносителя и средней температурой холодного теплоносителя, К.

$$\Delta t = t'_{сг} - t_{сг}^p.$$

Температура поверхности нагрева со стороны холодного теплоносителя  $t'_{сг}$  определяется из уравнения баланса удельных тепловых потоков:

$$q = \alpha_1(t_n - t_{сг}) = (\lambda_{сг}/\delta_{сг})(t_{сг} - t'_{сг}) = \alpha_2(t'_{сг} - t_{сг}^p). \quad (2.16)$$

Критерий Нуссельта  $Nu$  характеризует интенсивность теплообмена:

$$Nu = \alpha d_{вн}/\lambda, \quad (2.17)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

По приведенным формулам рассчитывают значения критериев, а затем по выбранному в зависимости от режима движения критериальному уравнению определяют критерий Нуссельта  $Nu$ . По найденному критерию Нуссельта рассчитывают коэффициент теплоотдачи [из формулы (2.17)].

2. Если в качестве горячего теплоносителя используют сухой насыщенный водяной пар, то при соприкосновении его с поверхностью нагрева за счет отдачи теплоты происходит конденсация пара. Конденсация бывает капельная и пленочная. При капельной конденсации (рис. 2.1) образующийся конденсат осаждается на несмачиваемой поверхности в виде отдельных капель.

При пленочной конденсации (рис. 2.2) конденсат образует на поверхности нагрева сплошную пленку. В этом случае интен-

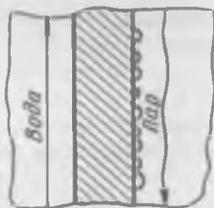


Рис. 2.1. Схема капельной конденсации

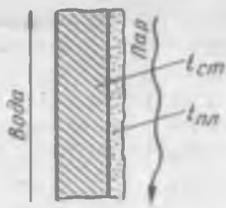


Рис. 2.2. Схема пленочной конденсации

сивность теплоотдачи ниже, чем при капельной конденсации, так как передача теплоты от пара к поверхности нагрева происходит через пленку конденсата, которая оказывает большое термическое сопротивление, поэтому толщина пленки существенно влияет на теплоотдачу.

Коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации определяется из критериального уравнения

$$Nu = z(Pr Ga Ku)^{0,25}, \quad (2.18)$$

где  $Ga$  — критерий Галлилея;  $Ku$  — критерий Кутателадзе;

по формуле

$$\alpha = A\sqrt{(r\rho\lambda^3g)/(vH\Delta t_{пк})}, \quad (2.19)$$

где  $A$  — коэффициент, зависящий от расположения поверхности нагрева (для вертикальных аппаратов  $A = 1,15$ , для горизонтальных  $A = 0,72$ );  $r$  — удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $\rho$  — плотность пленки конденсата, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности пленки конденсата, Вт/(м·К);  $v$  — кинематический коэффициент вязкости пленки конденсата, м<sup>2</sup>/с;  $H$  — высота стенки, на которой происходит конденсация, м (для вертикальных аппаратов  $H = l_{тр}$ ; для горизонтальных аппаратов, если пар проходит в межтрубном пространстве,  $H = d_{нар}$ );  $\Delta t_{пк}$  — перепад температур на пленке конденсата, К.

Перепад температур на пленке конденсата равен разности температур пара и стенки со стороны пара:

$$\Delta t_{пк} = t_{п} - t_{ст}.$$

Чем толще пленка конденсата, тем хуже происходит теплоотдача, тем ниже температура стенки и больше  $\Delta t_{пк}$ .

Все параметры пленки конденсата зависят от ее средней температуры, которая определяется как средняя арифметическая величина температуры пара и стенки.

**Средний температурный напор.** В непрерывном процессе теплообмена при движении теплоносителей вдоль поверхности нагрева температура обоих или одного из них изменяется. Характер ее изменения зависит в основном от агрегатного состояния и взаимного направления движения теплоносителей (рис. 2.3).

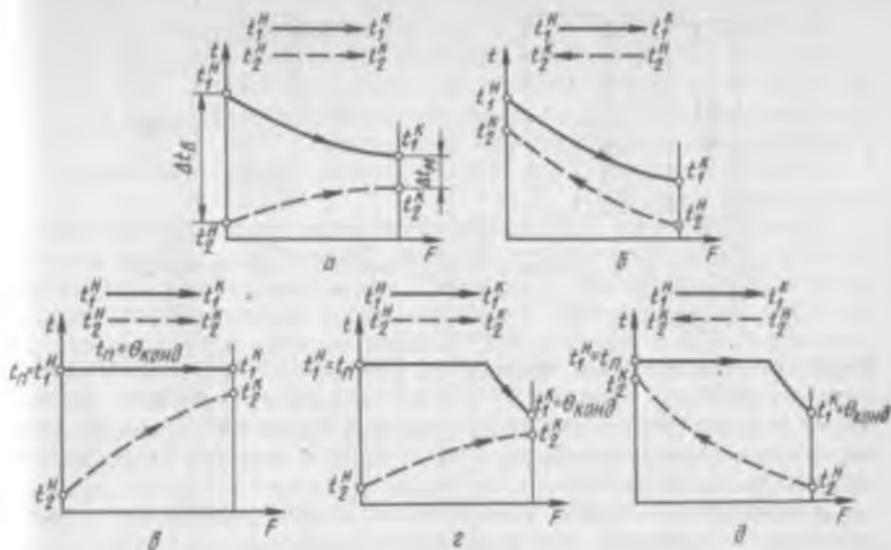


Рис. 2.3. Графики изменения температуры теплоносителей в процессе теплообмена в одноходовых аппаратах:

а и б — прямоток и противоток без изменения агрегатного состояния теплоносителей; в — паровой обогрев при  $\theta_{\text{конд}} = t_{\text{н}}$  и д — паровой обогрев при  $\theta_{\text{конд}} < t_{\text{н}}$  (г — прямоток, д — противоток)

Так, при прямотоке без изменения агрегатного состояния теплоносителей температура горячего теплоносителя снижается от  $t_1^H$  до  $t_1^N$ , а температура холодного теплоносителя повышается от  $t_2^H$  до  $t_2^N$ . При этом разность температур теплоносителей вдоль поверхности нагрева изменяется от  $\Delta t'$  до  $\Delta t''$ ; на одном конце поверхности большая разность, на другом конце — меньшая:

$$\Delta t_6 = \Delta t' = t_1^H - t_2^H;$$

$$\Delta t_m = \Delta t'' = t_1^N - t_2^N.$$

Поэтому необходимо определить среднюю разность температур теплоносителей  $\Delta t_{\text{ср}}$  между большей  $\Delta t_6$  и меньшей  $\Delta t_m$  разностями по формуле

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{2.3 \lg \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}. \quad (2.20)$$

При линейном характере изменения температуры теплоносителей и при  $\Delta t_6 / \Delta t_m < 2$  с достаточной степенью точности можно рассчитать среднее арифметическое значение  $\Delta t_{\text{ср}}$ :

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_m}{2}. \quad (2.21)$$

По формуле (2.20) или (2.21) определяют среднюю разность температур теплоносителей в случае теплообмена без изменения агрегатного состояния теплоносителей при прямотоке (рис. 2.3, а), противотоке (рис. 2.3, б) и паровом обогреве (рис. 2.3, в, г, д) в одноходовых теплообменных аппаратах.

Среднюю разность температур можно определить также по номограмме (рис. 2.4).

В многоходовых аппаратах теплоносители движутся вдоль какой-то части поверхности нагрева прямотоком, вдоль другой части — противотоком, т. е. имеет место смешанный (переменный) ток теплоносителей. Условные схемы изменения температур теплоносителей в двухходовых аппаратах показаны на рис. 2.5. Горячий теплоноситель, параметры которого с индексом 1 (жидкость, газ — см. рис. 2.5, а, б, конденсирующийся пар — рис. 2.5, в, г), делает в межтрубном пространстве аппарата один ход с изменением температуры от  $t_1^*$  до  $t_1^*$ , а холодный теплоноситель, параметры которого с индексом 2, делает в трубах два хода, нагреваясь от  $t_2^*$  до  $t_2^*$ . При этом возможны два случая: в первом ходе — прямоток, во втором — противоток (рис. 2.5, а, в) и, наоборот, в первом ходе — противоток, во втором — прямоток (рис. 2.5, б, г).

При смешанном токе средняя разность температур теплоносителей несколько меньше, чем при противотоке; рекомендуется определять ее по формуле

$$\Delta t_{cp} = \epsilon_M \Delta t_{cp}^{prot}, \quad (2.22)$$

где  $\epsilon_M$  — поправочный коэффициент, зависящий от взаимного направления движения теплоносителей и их начальных и конечных температур; определяется графически в зависимости от значения величин  $R$  и  $P$ ;  $\Delta t_{cp}^{prot}$  — средняя разность температур теплоносителей при противотоке.

$$P = \frac{t_2^* - t_2^*}{t_1^* - t_1^*};$$

$$R = \frac{t_1^* - t_1^*}{t_2^* - t_2^*}.$$

На рис. 2.6 приведен график зависимости  $\epsilon_M = f(P, R)$  для двухходового аппарата.

Средняя разность температур теплоносителей является движущей силой процесса теплопередачи и называется средним температурным напором.

**Гидравлическое сопротивление аппарата.** На интенсивность теплообмена существенно влияет скорость движения теплоносителей в аппарате. Повышение скорости увеличивает турбулентность потока, снижает образование накипи, в результате чего увеличивается коэффициент теплопередачи. Однако значительное повышение скорости теплоносителя приводит к увеличению поте-

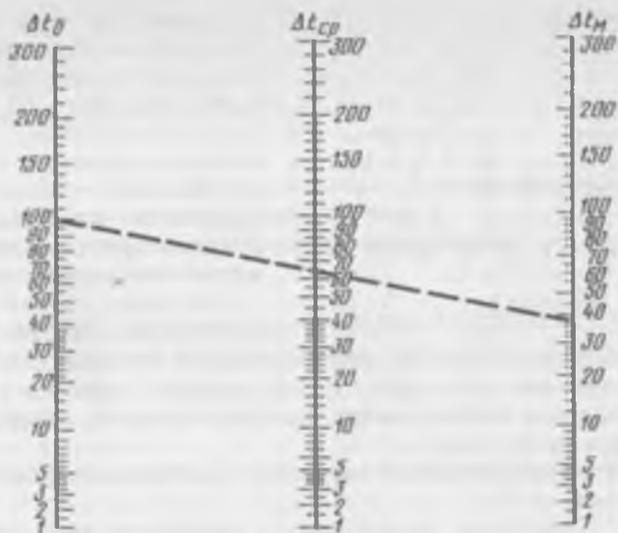


Рис. 2.4. Номограмма для определения  $\Delta t_p$

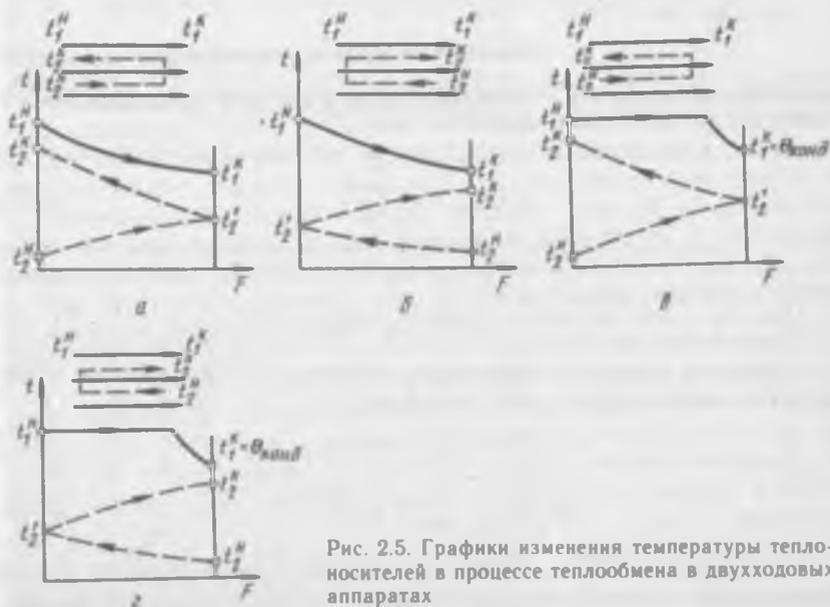


Рис. 2.5. Графики изменения температуры теплоносителей в процессе теплообмена в двухходовых аппаратах

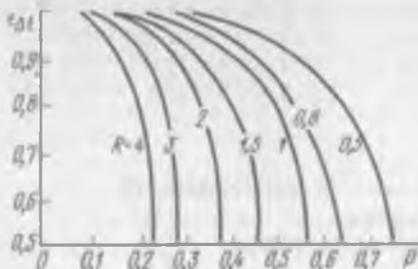


Рис. 2.6. График зависимости  $\epsilon_M = f(l, R)$

ния конфигурации потока теплоносителя в результате конструктивных особенностей аппарата (расширение, сужение и изменение направления трубопровода, наличие вентилей, кранов, заслонок, диафрагм и т. п.).

Потери давления на преодоление сопротивления трения в прямых каналах (в Па)

$$\Delta p_{тр} = \lambda_{тр} \frac{l}{d_m} \frac{\rho v^3}{2}, \quad (2.23)$$

где  $\lambda_{тр}$  — коэффициент гидравлического сопротивления трения; зависит от режима движения жидкости и степени шероховатости труб:  
при  $Re \leq 2320$

$$\lambda_{тр} = 64/Re, \quad (2.24)$$

при  $2320 < Re < 10\,000$

$$1/\sqrt{\lambda_{тр}} = (1,81 \lg Re) - 1,5; \quad (2.25)$$

$l$  — длина канала, м;  $d_m$  — эквивалентный диаметр потока, м;  $v$  — скорость движения теплоносителя, м/с;  $\rho$  — плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>.

Потери давления на преодоление местных сопротивлений

$$\Delta p_{м.с} = \sum \xi \frac{\rho v^3}{2}, \quad (2.26)$$

где  $\sum \xi$  — сумма коэффициентов местных сопротивлений; определяется по таблице в зависимости от особенностей конструкции аппарата, вызывающих изменение условий движения теплоносителя.

Таким образом, потери давления (в Па) на преодоление гидравлических сопротивлений при движении теплоносителя в аппаратах можно определить по формуле

$$\Delta p = \Delta p_{тр} + \Delta p_{м.с}, \quad (2.27)$$

или

$$\Delta p = \left( \lambda_{тр} \frac{l}{d_m} + \sum \xi \right) \frac{\rho v^3}{2}. \quad (2.28)$$

Величина потерь давления определяет расход энергии на перемещение теплоносителя в аппарате и, следовательно, являет-

ри давления теплоносителя на преодоление сопротивлений при прохождении его через аппарат.

Гидравлическое сопротивление аппарата складывается из сопротивления трения по длине прямолнейных труб (каналов) и местных сопротивлений.

Местные сопротивления возникают в местах измене-

ся важным показателем экономичности работы аппарата. В связи с этим скорость движения теплоносителя должна выбираться в оптимальных пределах, определяемых интенсивностью теплообмена и расходом энергии при работе аппарата (для жидкости в прямых трубах  $v = 1-2$  м/с).

**Работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ ПРОЦЕССА НАГРЕВАНИЯ ОТ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ И ЧИСЛА ХОДОВ В ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ**

Исследование проводят при нагревании жидкости паром в одно- и двухходовом кожухотрубчатых теплообменных аппаратах.

**Цель работы**

1. Изучение процесса теплообмена на действующих аппаратах.
2. Определение общего коэффициента теплопередачи по данным испытаний и выявление его зависимости от скорости движения жидкости.
3. Определение потерь давления на преодоление гидравлических сопротивлений в аппаратах и выявление зависимости их от скорости движения жидкости и числа ходов.
4. Определение потерь теплоты в окружающую среду.

**Описание экспериментальных установок**

**Одноходовой теплообменный аппарат.** Трубчатый теплообменный аппарат, в котором один из теплоносителей поступает сразу во все трубы, проходит по ним вдоль аппарата один раз и выходит, называют **одноходовым** (по трубному пространству).

Одноходовой теплообменный аппарат (рис. 2.7) состоит из цилиндрического корпуса 1 с трубными решетками 6, в которых развальцованы шесть латунных труб 18 [для латуни  $\lambda = 92,8$  Вт/(м·К); диаметр труб 20/22 мм, длина 850 мм]. Сверху и снизу аппарат закрыт крышками 5 и 11. Вода в аппарате нагревается паром.

Холодная вода поступает в нижнюю распределительную коробку аппарата из водопроводной сети через вентиль 10 и проходит внутри всех труб аппарата. Температура холодной воды измеряется термометром 8 на подводящей трубе. Подогретая вода, температура которой определяется по термометру 4, выходит из аппарата. Для определения количества воды, проходящей через аппарат, на трубопроводе холодной воды после вентиля 10 установлен расходомер 9.

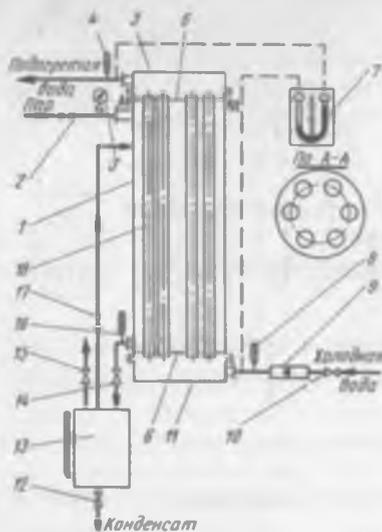


Рис. 2.7. Схема одноходового теплообменного аппарата:

1 — корпус; 2, 10, 12, 14, 15, 17 — вентили; 3 — манометр; 4, 8, 16 — термометры; 5, 11 — крышки; 6 — трубные решетки; 7 — дифманометр; 9 — расходомер; 13 — мерник; 18 — трубы

Для определения разности давления воды на входе и выходе (вследствие преодоления гидравлических сопротивлений аппарата) предназначен дифманометр 7.

Греющий пар поступает в аппарат через вентиль 2 из котельной. Давление пара определяют по манометру 3. Пар в аппарате проходит в межтрубном пространстве. Конденсат, температуру которого определяют по термометру 16, через вентиль 14 поступает в мерник 13. Это позволяет определить расход пара. Из мерника конденсат сливается через вентиль 12.

Недостатком одноходовых теплообменных аппаратов является несоответствие между пропускной способностью труб и поверхностью нагрева. Аппарат работает при малой скорости движения теплоносителей

в трубах и, следовательно, при невысоком коэффициенте теплопередачи.

**Двухходовой теплообменный аппарат.** Для повышения интенсивности теплопередачи в многотрубных аппаратах устанавливают перегородки, разделяющие распределительные коробки на секции, а трубы — на пучки. Жидкость поступает в первую секцию, поднимается по пучку труб во вторую секцию, опускается по другому пучку труб и так последовательно проходит по всем пучкам, т. е. делает в аппарате несколько ходов. Такие аппараты называют многоходовыми.

Таким образом, в многоходовом аппарате жидкость проходит не сразу по всем трубам, а только по трубам одного хода, т. е. через меньшее поперечное сечение. При том же расходе жидкости это приводит к увеличению скорости ее движения в аппарате, а следовательно, к увеличению коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи.

Двухходовой трубчатый теплообменный аппарат (рис. 2.8) состоит из цилиндрического корпуса 1, в котором между двумя трубными решетками 7 расположено шесть латунных труб 18. Пространство между верхней крышкой 5 и трубной решеткой

(распределительная коробка) разделено перегородкой 6 на две секции, благодаря чему в аппарате образуется два хода (по три трубы в каждом ходе). Вода в аппарате нагревается паром.

Холодная вода через вентиль 10 поступает в первую секцию, проходит, нагреваясь, по трем трубам первого хода вниз до второй секции, перетекает в ней в три трубы второго хода, поднимается по ним в третью секцию и отводится из нее в сливную линию. Таким образом, вода, постепенно нагреваясь, проходит через весь аппарат по трубам два раза, т. е. делает два хода.

Температура холодной воды определяется по термометру 8, подогретой — по термометру 4, расход воды — по расходомеру 9.

Для определения разности давлений со стороны воды на входе и выходе из аппарата предназначен дифманометр 19.

Пар через вентиль 2 поступает в межтрубное пространство аппарата. Давление пара определяют по манометру 3, расход пара — по количеству конденсата, который через вентиль 14 стекает в мерник 13. Температуру конденсата определяют по термометру 16.

Для автоматического измерения температур, необходимых для расчета, установки снабжены электронным автоматическим уравнивающим мостом. Последний работает в комплекте с термометром сопротивления и может регистрировать температуру в шести точках. Термометры сопротивления размещены в латунных гильзах, которые расположены непосредственно в местах измерения температуры конденсата, холодной воды, поступающей в аппарат, нагретой воды, выходящей из аппарата, и греющего пара.

Прибор снабжен переключателем, автоматически подключающим к измерительной схеме поочередно все термометры сопротивления.

Запись температуры производится печатающей кареткой на движущейся диаграммной ленте точками с указанием номеров

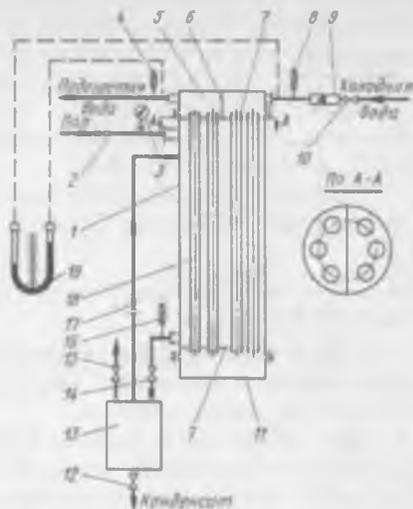


Рис. 2.8. Схема двухходового теплообменного аппарата:

1 — корпус; 2, 10, 12, 14, 15, 17 — вентили; 3, 19 — манометры; 4, 8, 16 — термометры; 5, 11 — крышки; 6 — перегородка; 7 — трубные решетки; 9 — расходомер; 13 — мерник; 18 — латунные трубы

термометров сопротивления. Точки образуют на ленте линии, характеризующие изменения во времени температуры в каждой характерной точке (месте) установки.

Цикл печатания (время между двумя печатаниями) 20 с. Основная погрешность показаний по шкале прибора и записи на ленте не превышает 0,5 %.

По диаграммной ленте можно подсчитать продолжительность проведения испытания (в мин) по формуле

$$\tau = 2(n - 1), \quad (2.29)$$

где  $n$  — число отпечатанных на диаграмме точек для одного из термометров сопротивления.

Таким образом, необходимые величины можно рассчитать по показаниям термометров на установке, а также по данным, записанным на ленте прибора.

Для нормальной работы аппаратов, обогреваемых паром, необходим непрерывный отвод из них конденсата. При этом недопустимы потери несконденсировавшегося пара с уходящим из аппарата конденсатом. Отвод несконденсировавшегося пара из мерника 13 осуществляется по отводной линии с вентилем 17. Линия с вентилем 15 предназначена для сообщения сборника с атмосферой.

#### **Методика проведения испытания**

Для достижения поставленных целей следует провести три испытания на одноходовом аппарате с разными расходами воды и три испытания на двухходовом аппарате с такими же расходами воды.

Перед началом испытания одноходовой аппарат готовят к пуску: открывают вентиль 10 (см. рис. 2.7 и 2.8) для подачи холодной воды в аппарат, устанавливают максимальный расход воды по указанию преподавателя (в зависимости от типа расходомера). Затем открывают вентиль 14 на трубопроводе для отвода конденсата (у мерника). (Вентиль 15 в это время должен быть закрыт.) Далее открывают вентиль 2 для подачи в аппарат пара. Количество поступающего пара должно быть таким, чтобы вода в аппарате нагревалась до 50—80 °С. После этого открывают вентиль 17.

С этого момента температура воды на выходе из аппарата начинает повышаться. Спустя некоторое время, когда прогреются трубы и корпус аппарата, температура выходящей воды установится постоянной (при постоянном давлении пара и постоянном количестве проходящей воды).

Момент установления постоянной температуры воды на выходе из аппарата, характеризующий наступление стационарного режима, принимают за начало испытания. В этот момент заме-

Протокол № 1

Аппарат . . . . .

№	Время от начала испытания $t$ , мин	Вода			Горячий пар		Конденсат		Передаточный		Примечание $\Delta K_{\text{пр}}$ — $K_{\text{пр}}$ — $K_{\text{пр}+1}$
		показание расходуемой $K$	количество во $V_{\text{в}}$ , л	температура на входе $t_{\text{в}}$ , °C	температура на выходе $t_{\text{г}}$ , °C	показание прибора	$p_{\text{г}}$ , МПа	температура $t_{\text{г}}$ , °C	количество во $D$ , л	температура $t_{\text{к}}$ , °C	
1	0 5 10 ⋮		$V_{\text{в}}^{\text{пр}}$	$t_{\text{в}}^{\text{пр}}$	$t_{\text{г}}^{\text{пр}}$	$p_{\text{г}}^{\text{пр}}$	$t_{\text{г}}^{\text{пр}}$	$D_{\text{пр}}^{\text{пр}}$	$t_{\text{к}}^{\text{пр}}$		$\Delta p_{\text{пр}}$
2	0 5 10 ⋮		$V_{\text{в}}^{\text{пр}}$	$t_{\text{в}}^{\text{пр}}$	$t_{\text{г}}^{\text{пр}}$	$p_{\text{г}}^{\text{пр}}$	$t_{\text{г}}^{\text{пр}}$	$D_{\text{пр}}^{\text{пр}}$	$t_{\text{к}}^{\text{пр}}$		$\Delta p_{\text{пр}}$
3	0 5 10 ⋮		$V_{\text{в}}^{\text{пр}}$	$t_{\text{в}}^{\text{пр}}$	$t_{\text{г}}^{\text{пр}}$	$p_{\text{г}}^{\text{пр}}$	$t_{\text{г}}^{\text{пр}}$	$D_{\text{пр}}^{\text{пр}}$	$t_{\text{к}}^{\text{пр}}$		$\Delta p_{\text{пр}}$

чают время, записывают нулевое показание расходомера, закрывают краны на выходе из мерника для конденсата.

В процессе испытания аппарата через каждые 3—5 мин от начала работы регистрируют следующие данные:

температуру поступающей в аппарат холодной воды  $t_2^H$ ;

температуру выходящей из аппарата нагретой воды  $t_2^H$ ;

показание расходомера для воды  $N$ ;

давление греющего пара  $p_n$  по манометру на подводщем паропроводе;

расход греющего пара  $D$  по количеству конденсата (по показанию расходомера или объему в мернике);

температуру конденсата  $\Theta_{\text{конд}}$  по термометру;

перепад давления в аппарате  $\Delta p$  со стороны воды по дифманометру.

Продолжительность испытания аппарата 20—30 мин. Затем проводят еще два испытания аппарата и делают аналогичные замеры при расходе воды, вдвое и втрое меньшем по сравнению с первым испытанием. Аналогично проводят три испытания с такими же расходами воды на двухходовом аппарате.

Все данные испытаний записывают в протокол испытания № 1.

По окончании испытания аппарат выключают в следующем порядке: закрывают сначала вентиль для подачи пара, затем вентиль для подачи холодной воды и сливают конденсат из мерника.

### Обработка результатов испытания

Расчет проводят отдельно для каждого испытания обоих аппаратов. Для расчета используют средние значения температуры холодной и нагретой воды, давления и температуры пара [среднюю температуру пара определяют по его среднему давлению (по приложению 1)], среднее значение перепада давления, общее количество прошедшего через аппарат конденсата, найденное по данным протокола за все время каждого испытания, а также количество прошедшей через аппарат воды (в л), которое определяется разностью последнего и первого показаний расходомера ( $V_{\text{общ}} = N_n - N_1$ ). Для проверки равномерности поступления воды в аппарат определяют и записывают в протокол количество прошедшей воды за каждые 3—5 мин как разность между последующим и предыдущим показаниями расходомера ( $\Delta V_1 = N_2 - N_1$ ;  $\Delta V_2 = N_3 - N_2$  и т. п.).

**Определение расчетного коэффициента теплопередачи.** Так как поверхностью нагрева в аппарате являются трубы, коэффициент теплопередачи рассчитывают по формуле (2.8) для цилиндрической стенки. Предварительно определяют коэффи-

циенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара поверхности нагрева  $\alpha_1$  для вертикального аппарата рассчитывают по формуле (2.19). Для этого по среднему давлению пара (см. приложение 1) находят его температуру  $t_n = t_n^p$  и удельную теплоту парообразования  $r$ .

По приложению 2 определяют параметры пленки конденсата, которые зависят от ее температуры. Эта температура равна измеренной при испытании аппарата температуре конденсата, т. е.  $t_{пл} = \Theta_{конд}$ .

Для расчета коэффициента  $\alpha_1$  следует определить значение перепада температур на пленке конденсата, т. е. разность между температурами пара и стенки со стороны пара. Можно принять, что температура пленки конденсата  $t_{пл}$  является средней между температурой пара и стенки со стороны пара

$$t_{пл} = \frac{t_n + t_{ст}}{2},$$

откуда

$$t_{ст} = 2t_{пл} - t_n$$

и тогда

$$\Delta t_{пк} = t_n - t_{ст}.$$

Коэффициент теплоотдачи от поверхности нагрева воде  $\alpha_2$  определяют из критериального уравнения. Для его выбора предварительно определяют режим движения воды в аппарате по значению критерия Рейнольдса [см. формулу (2.13)].

По средней температуре воды находят ее параметры ( $\rho$ ,  $c$ ;  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $\beta$ ) по приложению 2. Среднюю температуру воды в аппарате предварительно определяют по выражению:

$$t_f^p = \frac{t_1 + t_2}{2}. \quad (2.30)$$

Из уравнения расхода находят скорость движения воды:

$$v = V_{сек} / S, \quad (2.31)$$

где расход воды  $V_{сек} = V_f^{см} / 60 \cdot 1000$ ;

площадь поперечного сечения потока воды

$$S = (\pi d_{ин}^2 / 4) n',$$

где  $n'$  — число труб в одном ходе аппарата.

Найденные величины подставляют в формулу (2.13).

В зависимости от режима движения воды выбирают критериальное уравнение (2.10) или (2.11) либо (2.12). Критерий Прандтля рассчитывают по формуле (2.14).

По выбранному критериальному уравнению находят критерий Нуссельта [формула (2.17)] и определяют коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_2 = \text{Nu}\lambda/d_{\text{вн}}.$$

По найденным коэффициентам теплоотдачи находят коэффициент теплопередачи  $k_{\text{расч}}$  [формула (2.8)]. Затем рассчитывают коэффициент теплопередачи для плоской стенки

$$k_{\text{расч}} = k_{l\text{расч}}/\pi d_{\text{ср}}.$$

**Определение практического коэффициента теплопередачи.** При использовании формулы (2.8) для расчета коэффициента теплопередачи  $k_{l\text{расч}}$  не учитывают термические сопротивления накипи и других отложений на поверхности нагрева, которые образуются при эксплуатации аппарата. Эти термические сопротивления значительно снижают величину практического коэффициента теплопередачи  $k_{l\text{практ}}$  и  $k_{\text{практ}}$ . Для учета термического сопротивления отложений на поверхности нагрева аппарата предназначен коэффициент использования поверхности нагрева  $\varphi$ :

$$k_{\text{практ}} = \varphi k_{\text{расч}}. \quad (2.32)$$

**Практический коэффициент теплопередачи**

$$k_{\text{практ}} = Q/\Delta t_{\text{ср}}\tau F, \quad (2.33)$$

где  $Q$  — количество теплоты, переданное от пара воде и пошедшее на ее нагревание (в Дж).

$$Q = Q_2 = G_2 c_2 (t_2^* - t_2^*); \quad (2.34)$$

$\Delta t_{\text{ср}}$  — средний температурный напор;  $\tau$  — продолжительность процесса, с;  $F$  — площадь поверхности нагрева аппарата, м<sup>2</sup>.

$$F = \pi d_{\text{ср}} l n, \quad (2.35)$$

здесь  $d_{\text{ср}}$  — средний диаметр труб, м ( $d_{\text{ср}} = \frac{d_{\text{вн}} + d_{\text{вн}}}{2}$ );  $l$  — длина труб, м;  $n$  — число труб в аппарате.

Для определения  $\Delta t_{\text{ср}}$  строят температурную диаграмму изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности нагрева и определяют следующие величины:

разность температур теплоносителей на одном конце аппарата (внизу)

$$\Delta t' = \Theta_{\text{конд}} - t_2^*;$$

разность температур на другом конце аппарата (вверху)

$$\Delta t'' = t_n - t_2^*.$$

В зависимости от отношения  $\Delta t'/\Delta t''$  для расчета  $\Delta t_{\text{ср}}$  выбирают формулу (2.20) или (2.21).

Определение потерь теплоты в окружающую среду. Потери теплоты в окружающую среду (в %)

$$Q_{\text{пот}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100. \quad (2.36)$$

Количество теплоты, отданное в аппарате горячим теплоносителем (в Дж):

при температуре выходящего конденсата ниже температуры пара ( $\theta_{\text{конд}} < t_n$ )

$$Q_1 = Dr + Dc_{\text{конд}}(t_n - \theta_{\text{конд}}); \quad (2.37)$$

при температуре выходящего конденсата, равной температуре пара ( $\theta_{\text{конд}} = t_n$ )

$$Q_1 = Dr, \quad (2.38)$$

где  $D$  — количество конденсата за время испытания, кг.  $D = (D^{\text{об}} \rho_{\text{конд}}) / 1000$  (здесь  $\rho_{\text{конд}}$  — плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup>; определяется при средней температуре конденсата  $\theta_{\text{конд}}$ , по приложению 2).

Количество теплоты, пошедшее на нагревание воды (в Дж):

$$Q_2 = G_2 c_2 (t_2^{\text{в}} - t_2^{\text{н}}),$$

где  $G_2$  — количество воды, прошедшей через аппарат, кг  $G_2 = (V_2^{\text{об}} \rho) / 1000$ .

Тепловой КПД аппарата

$$\eta = Q_2 / Q_1. \quad (2.39)$$

**Определение зависимости потерь давления от скорости.** Для выявления зависимости потерь давления на преодоление гидравлических сопротивлений в аппарате от скорости воды строят график зависимости  $\Delta p = f(v)$  по данным средних значений этих величин в каждом испытании (из протокола № 1). Эти же данные записывают в протокол № 2.

Для проверки экспериментально измеренных потерь давления на преодоление гидравлических сопротивлений в аппарате производят расчет их по формулам в такой последовательности.

Рассчитывают потери давления на преодоление водой сопротивления трения в трубах  $\Delta p_{\text{тр}}$  по формуле (2.23). Для этого предварительно по ранее найденному значению критерия Рейнольдса определяют коэффициент гидравлического сопротивления трения  $\lambda_{\text{тр}}$  по формуле (2.24) или (2.25) в зависимости от режима движения воды.

Затем находят потери давления на преодоление местных сопротивлений  $\Delta p_{\text{м.с}}$  по формуле (2.26). Для этого предварительно выявляют места и виды местных сопротивлений по ходу движения воды в аппарате (показывают их на схеме аппарата в отчете); для каждого внезапного сужения и расширения потока

воды рассчитывают отношения площадей сечения  $f_m/f_0$  и по ним и величине критерия Re определяют соответствующие значения коэффициентов местных сопротивлений  $\xi$  по приложению 3.

### Протокол № 2

Вид местного сопротивления					
Отношение сечений $f_m/f_0$					
Значения коэффициентов $\xi$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	...	$\Sigma \xi$

Далее определяют полные потери давления на преодоление гидравлических сопротивлений в аппарате:

$$\Delta p = \Delta p_{тр} + \Delta p_{м.к.}$$

Полные потери давления рассчитывают для каждого испытания аппарата, т.е. для разных значений скорости воды. Результаты всех расчетов для обоих аппаратов записывают в табл. 7. На график зависимости  $\Delta p = f(v)$  наносят результаты расчетов  $\Delta p$  для каждого аппарата.

### 7. Сводная таблица результатов испытаний теплообменных аппаратов

Аппарат	Испытание	Расход воды $V_{ср}$ , м <sup>3</sup> /с	Скорость воды $v$ , м/с	Коэффициент теплоотдачи $\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Коэффициент теплопередачи		Потери давления $\Delta p$ , МПа		Примечание
					$k_{расч.}$ , Вт/(м·К)	$k_{расч.}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	по показаниям прибора	расчетные	
Одноходовой	1								
	2								
	3								
Двухходовой	1								
	2								
	3								

### Материалы для самоподготовки

№ п/п	Элемент изучаемого материала	Характер мыслительной деятельности и цель контроля	
		при допуске к выполнению лабораторных работ	при защите лабораторных работ
1	Цель работы	Воспроизведение целей работы	
2	Коэффициент теплоотдачи	Смысл и единицы измерения	Анализ влияния отдельных факторов на коэффициент теплоотдачи

№ п/п	Элемент изучаемого материала	Характер мыслительной деятельности и цель контроля	
		при допуске к выполнению лабораторных работ	при защите лабораторных работ
3	Коэффициент теплопередачи	Факторы, влияющие на коэффициент теплоотдачи	Анализ путей увеличения коэффициента теплоотдачи и обоснование их целесообразности
		<p>Величины, на которые влияет коэффициент теплоотдачи</p> <p>Смысл и единицы измерения</p>	<p>Анализ влияния коэффициента теплоотдачи на показатели процесса</p> <p>Анализ влияния отдельных факторов на коэффициент теплопередачи</p>
4	Средний температурный напор	Факторы, влияющие на коэффициент теплопередачи	Анализ путей увеличения коэффициента теплопередачи и обоснование их целесообразности
		<p>Величины, на которые влияет коэффициент при проектировании и эксплуатации аппарата</p> <p>Смысл и единицы измерения</p>	<p>Анализ влияния коэффициента теплопередачи на показатели процесса нагревания</p> <p>Анализ влияния на средний температурный напор направления движения теплоносителей</p>
5	Основное уравнение теплопередачи	Факторы, влияющие на величину среднего температурного напора	Анализ путей увеличения среднего температурного напора
		<p>Величины, на которые влияет средний температурный напор</p> <p>Воспроизведение уравнения</p>	<p>Анализ влияния среднего температурного напора на показатели процесса нагревания</p> <p>Практическое применение уравнения теплопередачи</p>
6	Графики изменения температур теплоносителей в аппарате	Смысл отдельных величин в уравнении	
		<p>Воспроизведение графиков для прямотока и противотока при паровом обогреве (<math>\theta_{\text{конт}} = t_{\text{г}}</math> и <math>\theta_{\text{конт}} &lt; t_{\text{г}}</math>) для одно- и двухходового аппаратов</p>	Анализ особенностей графиков (смысл отдельных точек и участков на графиках)
7	Уравнение теплового баланса аппарата	Воспроизведение уравнений теплового баланса подогревателя при $\theta_{\text{конт}} = t_{\text{г}}$ и $\theta_{\text{конт}} < t_{\text{г}}$ .	
		Смысл отдельных величин в уравнениях	Практическое применение уравнения теплового баланса
8	Критерии подобия критерий Рейнольдса	Смысл отдельных критериев подобия	Смысл отдельных величин в формулах критериев подобия

№ п/п	Элемент изучаемого материала	Характер мыслительной деятельности и цель контроля	
		при допуске к выполнению лабораторных работ	при защите лабораторных работ
	критерий Прандтля критерий Нуссельта критерий Грасгофа	Воспроизведение формул критериев подобия	Использование отдельных критериев подобия
9	Потери теплоты в окружающей среду и тепловой КПД	Факторы, влияющие на величину потерь теплоты и тепловой КПД	Анализ путей снижения потерь теплоты и повышения КПД
10	Потери давления на преодоление местных сопротивлений $\Delta p_{\text{м.с}}$	Чем вызваны $\Delta p_{\text{м.с}}$ Факторы, влияющие на $\Delta p_{\text{м.с}}$	Анализ влияния отдельных факторов и особенностей аппарата на $\Delta p_{\text{м.с}}$ Анализ влияния $\Delta p_{\text{м.с}}$ на эксплуатационные затраты
11	Потери давления на преодоление трения $\Delta p_{\text{тр}}$	Чем вызваны $\Delta p_{\text{тр}}$ Факторы, влияющие на $\Delta p_{\text{тр}}$	Анализ влияния отдельных факторов и особенностей аппарата на $\Delta p_{\text{тр}}$ Анализ влияния $\Delta p_{\text{тр}}$ на эксплуатационные затраты
12	Схема установки	Название отдельных элементов установки и приборов Назначение отдельных приборов	
13	Одноходовой теплообменный аппарат	Воспроизведение схемы аппарата, вход и выход теплоносителей	
14	Многоходовые теплообменные аппараты	Воспроизведение схем аппаратов (от двухходового до шестиходового), вход и выход теплоносителей	Анализ влияния и обоснование целесообразного направления движения горячего теплоносителя на температуру нагреваемого теплоносителя Анализ влияния числа ходов на показатели интенсивности и экономичности процесса в аппарате Обоснование целесообразности применения аппаратов с разным числом ходов
15	Методика проведения работы	Последовательность операций и измерений при выполнении работы Назначение отдельных операций	Анализ использования для расчетов результатов измерений при выполнении работы

№ п/п	Элемент изучаемого материала	Характер мыслительной деятельности и цель контроля	
		при допуске к выполнению лабораторных работ	при защите лабораторных работ
16	Техника безопасности	Места в установке и операции, требующие особого внимания и осторожности при работе	

Результаты всех расчетов [в сводной таблице и на графике  $\Delta p = f(v)$ ] следует проанализировать и выводы написать в конце отчета о работе. Целесообразно все необходимые в работе многовариантные расчеты выполнить с применением ЭВМ и проанализировать результаты, выведенные на печать.

## **Работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОСИТЕЛЕЙ ПО ДЛИНЕ ТЕПЛООБМЕННИКА**

Движущей силой теплообменных процессов является разность температур между средами, при наличии которой тепло распространяется от среды с большей температурой к среде с меньшей температурой. Интенсивность теплообмена в аппарате зависит от взаимного направления движения сред в нем. Чаще всего на практике осуществляют прямоточное и противоточное движение теплоносителей. В зависимости от этого по-разному происходит распределение температуры по длине теплообменного аппарата.

### **Цель работы**

1. Определение коэффициента теплопередачи в теплообменном аппарате.
2. Аналитическое определение закономерностей распределения температуры по длине теплообменника.
3. Экспериментальное определение закономерностей распределения температуры по длине теплообменника.

### **Описание экспериментальной установки**

Исследование проводят на кожухотрубчатом аппарате типа «труба в трубе» (рис. 2.9). Теплообменник состоит из четырех двухтрубных теплообменных аппаратов *II*, соединенных патрубками и каналами. Внутренняя труба имеет диаметр 14/18 мм, наружная — 25/32 мм. Материал стенок труб — сталь. Длина

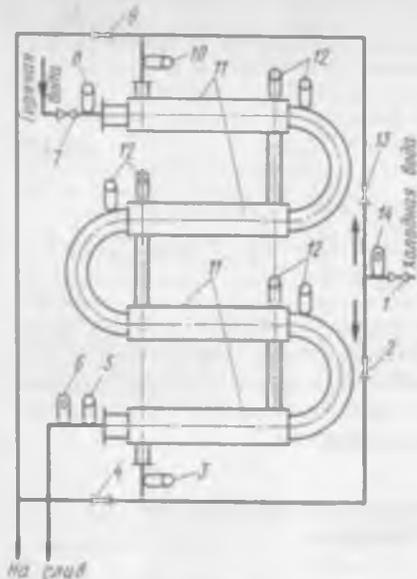


Рис. 2.9. Схема экспериментальной установки типа «труба в трубе»:

1, 2, 4, 7, 9, 13 — вентили; 3, 5, 8, 10, 12 — термометры; 6, 14 — ротаметры; 11 — секции теплообменника

воды. При работе по принципу противотока открывают вентили 2, 9.

Вентили 13 и 4 в это время закрыты. При работе по принципу прямотока открывают вначале вентили 13, 4. Вентили 2, 9 при этом закрыты. Устанавливают заданные преподавателем расходы горячей и холодной воды. Через 5 мин в течение 0,5 ч производят запись в протокол испытания показаний термометров и ротаметров.

### Обработка результатов испытания

Коэффициент теплопередачи [в Вт/(м<sup>2</sup>·К)]

$$k = Q/F\Delta t_{cp}, \quad (2.40)$$

где  $F$  — площадь поверхности теплообмена (определяется по среднему диаметру внутренней трубы), м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{cp}$  — среднелогарифмическая разность температур на концах теплообменника, К;  $Q$  — количество теплоты, полученное или отданное водой, Вт.

$$Q = G_1 c_1 (t_2' - t_1') = G_2 c_2 (t_1 - t_2), \quad (2.41)$$

одной секции теплообменной поверхности 1000 мм. Горячая вода подается сверху во внутреннюю трубу, холодная — в кольцевое пространство между трубами сверху по принципу прямотока и снизу по принципу противотока. Расход горячей и холодной воды регулируется вентилями 7, 13, а определяется ротаметрами 6, 14. Температура воды на концах теплообменника определяется стеклянными термометрами 3, 5, 8, 10, а подогретой воды в конце каждой секции — термометрами 12.

### Методика проведения испытания

Испытание проводят в таком порядке. Сначала открывают вентиль 7 для пуска горячей воды, затем вентиль 1 для пуска холодной

здесь  $c_1$  и  $c_2$  — удельная теплоемкость соответственно холодной и горячей воды (определяется по средней температуре воды), Дж/(кг·К);  $G_1$  и  $G_2$  — расход соответственно холодной и горячей воды, кг/с.

Массовый расход воды (в кг/с)

$$G = V\rho, \quad (2.42)$$

где  $\rho$  — плотность воды (определяется по средней температуре воды), кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — расход воды (определяется по ротаметру), м<sup>3</sup>/с.

Изменение температуры на поверхности теплообменника

$$\Delta t = \Delta t_n e^{-mxF}, \quad (2.43)$$

где  $\Delta t = t_2 - t_1$  — разность температур в различных сечениях теплообменника, К;  $\Delta t_n$  — разность температур в начале поверхности нагрева теплообменника, т. е. при  $F = 0$ ;  $m = 1/G_1c_1 \pm 1/G_2c_2$  — константа (знак «минус» соответствует противотоку), К.

Изменение температур при прямотоке:

$$\begin{aligned} t'_2 &\rightarrow t_2 \rightarrow t''_2; \\ t'_1 &\rightarrow t_1 \rightarrow t''_1; \\ t_2 - t_1 &= (t'_2 - t'_1)e^{-mxF}. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Соотношение между неизвестными температурами получим из уравнения теплового баланса

$$G_1c_1(t_1 - t'_1) = G_2c_2(t'_2 - t_2); \quad (2.45)$$

$$t_1 = t'_1 + \frac{G_2c_2}{G_1c_1}(t'_2 - t_2); \quad (2.46)$$

$$t_2 = \frac{t_1 + \frac{G_2c_2}{G_1c_1}t'_2 + (t_2 - t'_1)e^{-mxF}}{1 + G_2c_2/G_1c_1}. \quad (2.47)$$

Площадь поверхности теплообмена (в м<sup>2</sup>)

$$F = \pi d_c l,$$

где  $l$  — общая длина теплообменной поверхности, м.

Подставив численные значения в уравнения (2.46) и (2.47), получают распределение температур при прямотоке по длине теплообменника при разных значениях длины  $l$ . Данные расчета вносят в протокол № 1.

#### Протокол № 1

Расстояние $l$ , м	0	0,25	0,5	1	2	3
Температура греющей воды $t_2$ , °С						
Температура нагреваемой воды $t_1$ , °С						

Изменение температуры при противотоке

$$t'_2 \leftarrow t_2 \leftarrow t''_2;$$

$$t'_1 \rightarrow t_1 \rightarrow t''_1;$$

$$t_2 - t_1 = (t''_2 - t'_1)e^{-mkF}; \quad (2.48)$$

$$G_1c_1(t_1 - t'_1) = G_2c_2(t_2 - t''_2). \quad (2.49)$$

Решая совместно уравнения (2.48) и (2.49), получим

$$t_1 = t'_1 + \frac{G_2c_2}{G_1c_1}(t_2 - t''_2); \quad (2.50)$$

$$t_2 = \frac{t'_1 - \frac{G_2c_2}{G_1c_1}t''_2 + (t''_2 - t'_1)e^{-mkF}}{1 - G_2c_2/G_1c_1}. \quad (2.51)$$

Подставив численные значения величин в уравнения (2.50) и (2.51), получают распределение температур по длине теплообменника при противотоке. Данные расчета вносят в протокол № 2.

Протокол № 2

Направление движения	№ п/п	Продолжительность процесса т, мин	Греющая вода, °С					Нагреваемая вода, °С					
			t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	V <sub>гр</sub> , м <sup>3</sup> /с	t <sub>6</sub>	t <sub>7</sub>	t <sub>8</sub>	t <sub>9</sub>	V <sub>т</sub> , м <sup>3</sup> /с
Прямоток	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	7												
Среднее Противоток	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	7												
Среднее													

Примечание. Нумерацию участков длины начинают от места входа горячей воды в теплообменник.

Графическую зависимость изменения температуры теплоносителей по длине теплообменной поверхности получают, используя экспериментальные данные и данные аналитического расчета. По полученным результатам можно сделать вывод о целесообразности применения того или иного способа взаимного направления движения рабочих сред.

Вопросы для самопроверки

1. Что является движущей силой тепловых процессов?
2. В каком случае применяется принцип прямотока?
3. В каком случае применяется принцип противотока?
4. В каком случае (при прямотоке или противотоке) при прочих равных условиях больше расход теплоносителей?
5. Проанализировать уравнение, описывающее изменение температуры теплоносителя вдоль поверхности теплообмена?
6. Проанализировать уравнение для определения среднего температурного напора в теплообменном аппарате.

Список рекомендуемой литературы

Исаченко В. П., Осипова В. Л., Сукомел А. С. Теплопередача. — М.: Энергоиздат, 1981. — 416 с.  
 Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Т. 1. — М.: Химия, 1981. — 812 с.  
 Протодьяконов Н. И. Динамика процессов химической технологии. — Л.: Химия, 1985. — 240 с.

**Работа № 3. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА К ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НЕОГРАНИЧЕННОЙ ПЛАСТИНЫ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ НАГРЕВАНИЯ (НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛООБМЕН)**

В системном анализе объединяются три основных метода исследования процессов и аппаратов: аналитический, экспериментальный и объединенный (синтетический). Теоретической базой третьего метода исследования, широко распространенного в технике, является учение о подобии. Теория подобия дает возможность обобщить результаты частных (локальных) экспериментов и представить их в виде универсального расчетного критерия уравнения для условий, при которых проведены эксперименты. Вместе с тем теория подобия — своеобразный метод логического мышления в обобщенных переменных, когда уравнения процесса и краевые условия задаются в форме обобщенных переменных, т. е., по существу, системный анализ и теория подобия охватывают все три метода исследования.

Наглядное представление о применении математического моделирования при системном анализе можно получить при исследовании температурного поля тела в процессе его нагревания.

В данной задаче вначале описывают физическую модель процесса, затем проводят аналитическое исследование температурного поля, в результате чего получают общее решение задачи в критериальной форме. После этого проводят экспериментальное изучение процесса нагревания и сравнивают экспериментальные графики с картиной температурного поля, полученной на основании аналитического решения задачи.

## Цель работы

Исследование процесса нагревания тела с применением системного анализа и математического моделирования.

**Физическая модель процесса.** Температурным полем называют совокупность мгновенных значений температуры во всех точках пространства (тела). Процесс нагревания тела характеризуется нестационарным температурным полем, т. е. температура изменяется не только по координатам тела, но и во времени; иначе говоря, в процессе нагревания температура тела является функцией координат и времени:

$$t = f(\tau, x, y, z), \quad (2.52)$$

где  $x, y, z$  — пространственные координаты;  $\tau$  — время.

Уравнение (2.52) является математическим выражением трехмерного температурного поля.

Если температура является функцией только одной координаты, то поле называют одномерным:

$$t = f(x, \tau). \quad (2.53)$$

Примером одномерного температурного поля может служить поле неограниченной пластины при распространении теплоты нормально к ее поверхности. Неограниченной называют пластину, ширина и длина которой значительно превосходят ее толщину.

Такую пластину толщиной  $2R$  с равномерно распределенной начальной температурой  $t_0$  поместим в среду с постоянной температурой ( $t_c > t_0$ ). Теплообмен между поверхностями пластины и окружающей средой происходит по закону Ньютона:

$$q = \alpha(t_c - t_n), \quad (2.54)$$

где  $q$  — плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_c$  — температура среды, °С;  $t_n$  — температура на поверхности пластины, °С.

**Математическое описание процесса.** Процесс нагревания неограниченной пластины описывается дифференциальным уравнением теплопроводности

$$\frac{dt(x, \tau)}{d\tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (2.55)$$

где  $t(x, \tau)$  — температура пластины в точке с координатой  $x$  в момент времени  $\tau$ ;  $a$  — коэффициент температуропроводности, характеризующий теплоинерционные свойства материала, т. е. способность материала тела нагреваться или охлаждаться, м<sup>2</sup>/с.

Для однозначного решения уравнения (2.55) необходимо задать краевые условия. Они состоят из начального и гранично-

го условий. Начальное условие в случае равномерного распределения температуры в начальный момент времени имеет вид:

$$t(x, 0) = t_0 = \text{const.} \quad (2.56)$$

Граничное условие характеризует процесс теплообмена между поверхностью пластины и окружающей средой:

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial t(+R, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c - t(+R, \tau)] &= 0; \\ +\lambda \frac{\partial t(-R, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c - t(-R, \tau)] &= 0; \end{aligned} \quad (2.57)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности пластины, Вт/(м·К);  $\partial t/\partial x$  — температурный градиент, К/м.

На рис. 2.10 представлена схема задачи в виде кривых температурных полей. Начало координат находится в середине пластины, так как прогревание ее симметрично. Толщина пластины  $2R$ .

**Решение задачи.** При заданных краевых условиях решение дифференциального уравнения, полученное аналитическим методом или на ЭВМ, имеет вид:

$$E(x, t) = \frac{t(x, \tau) - t_c}{t_c - t_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cdot \cos \mu_n (x/R) e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (2.58)$$

$$\text{ctg} \mu_n = \frac{\mu_n}{\text{Bi}}, \quad (2.59)$$

где  $\mu_n$  — корни характеристического уравнения;  $\text{Bi} = \frac{\alpha}{\lambda} R$  — критерий Био;  $x/R$  — безразмерная (относительная) координата;  $e$  — основание натуральных логарифмов;  $Fo = \alpha t/R^2$  — критерий Фурье (критерий гомохронности или безразмерное время).

Решение записано для относительной (безразмерной) избыточной температуры

$$E(x, \tau) = \frac{t(x, \tau) - t_c}{t_c - t_0}$$

Уравнение (2.58) позволяет найти температуру в любой точке пластины в любой момент времени. Температурные кривые, построенные по уравнению (2.58), имеют вид, изображенный на рис. 2.11.

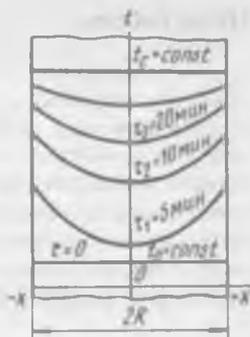


Рис. 2.10. Распределение температуры по толщине пластины в разные моменты времени (температурные поля)

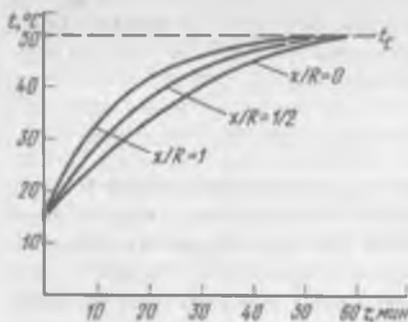


Рис. 2.11. Изменение температуры во времени для разных точек образца

Средняя температура пластины

$$E(\tau) = 1/R \int_0^R t(x, \tau) dx. \quad (2.60)$$

**Проверка адекватности решения.** Проверку адекватности аналитического решения задачи проводят путем сопоставления экспериментальных значений температуры в разных точках пластины с температурными графиками, построенными на основании данных математического анализа, или сравнения

температурных полей, полученных аналитическим и экспериментальным методами.

### Описание экспериментальной установки

Установка состоит из термостата, в котором с помощью терморегулятора поддерживается постоянная температура ( $t_c = 45-50^\circ\text{C}$ ). Для испытания используют образец, изготовленный из гипса в форме пластины размером  $40 \times 200 \times 200$  мм.

Для измерения температуры пластины применяют медьконстантановые термоэлектрические преобразователи (термопары) (рис. 2.12). Действие термоэлемента основано на следующем. Если концы двух проволок разных металлов, например меди и константана, спаять и место спая нагреть, то стрелка гальванометра, присоединенного к свободным концам, отклонится, свидетельствуя о протекании тока. Этот ток называют **термоэлектрическим**, а электродвижущую силу — **термоэлектродвижущей**.

Место соединения двух проводников представляет собой спай термоэлемента. Любой преобразователь имеет два спая: один —

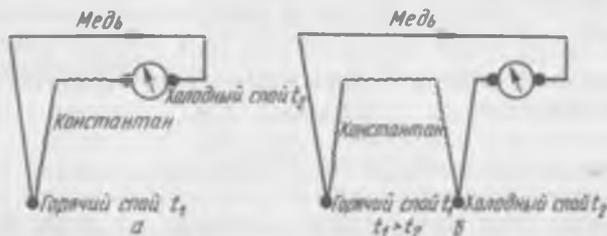


Рис. 2.12. Варианты установки термоэлектрических преобразователей:

а — первый; б — второй

в месте спая двух разных проводников, второй — в месте присоединения константанового провода к медной клемме измерительного прибора.

### Методика проведения испытания

Для проведения работы монтируют экспериментальную установку и оснащают ее необходимой контрольно-измерительной аппаратурой. Измерительный прибор будет показывать отклонение только в том случае, если температура спаев разная. Тот спай преобразователя, который помещают в измеряемую среду, называют горячим, а другой — холодным.

Если горячий спай поместить в среду с определенной температурой, то возникнет термоэлектродвижущая сила — ток пойдет в направлении от меди к константану. В месте холодного спаивания (клемма гальванометра) под действием температуры окружающей среды тоже разовьется термоэлектродвижущая сила, которая стремится вызвать ток в противоположном направлении. Следовательно, гальванометр будет показывать разность между термоэлектродвижущей силой горячего и холодного спаев. Если температура их одинакова, стрелка гальванометра не отклонится.

Таким образом, чтобы зафиксировать температуру, измеряемую термоэлектрическим преобразователем, необходимо знать температуру холодного спаивания. Желательно, чтобы она была постоянной во время работы. С этой целью в цепь вводят второй преобразователь холодного спаивания так, чтобы медный провод его был присоединен к клемме гальванометра, а константановый — к константановому проводу горячего спаивания. Холодный спай помещают в среду с постоянной температурой (тающий лед).

Прежде чем пользоваться гальванометром для определения температуры, необходимо построить тарировочную кривую, т. е. кривую зависимости между показаниями гальванометра и температурой, записывая одновременно показания гальванометра и температуру среды (по контрольному термометру), в которую помещена термопара.

Если при пользовании термопарами температура холодного спаивания отличается от ее значения, полученного при тарировке, необходимо ввести поправку. Если температура холодного спаивания  $t_{х,с}$  в опыте выше, чем при тарировке, то к найденному по кривой значению температуры нужно прибавить эту разницу. Если она ниже, чем при тарировке, то от найденной по кривой температуры нужно отнять эту разницу.

В образце установлены пять датчиков симметрично относительно центра пластины ( $R = 20$  мм):

№ 1 — на одной поверхности пластины;

№ 2 — на расстоянии  $x = 10$  мм от центра;

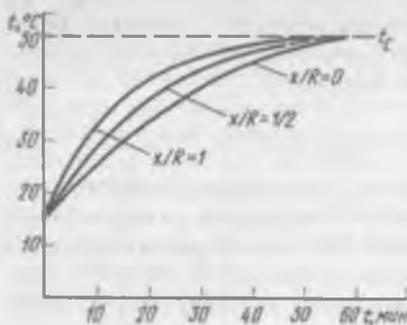


Рис. 2.11. Изменение температуры во времени для разных точек образца

Средняя температура пластины

$$E(\tau) = 1/R \int_0^R t(x, \tau) dx. \quad (2.60)$$

Проверка адекватности решения. Проверку адекватности аналитического решения задачи проводят путем сопоставления экспериментальных значений температуры в разных точках пластины с температурными графиками, построенными на основании данных математического анализа, или сравнения

температурных полей, полученных аналитическим и экспериментальным методами.

### Описание экспериментальной установки

Установка состоит из термостата, в котором с помощью терморегулятора поддерживается постоянная температура ( $t_c = 45-50^\circ\text{C}$ ). Для испытания используют образец, изготовленный из гипса в форме пластины размером  $40 \times 200 \times 200$  мм.

Для измерения температуры пластины применяют медьконстантановые термоэлектрические преобразователи (термопары) (рис. 2.12). Действие термоэлемента основано на следующем. Если концы двух проволок разных металлов, например меди и константана, спаять и место спая нагреть, то стрелка гальванометра, присоединенного к свободным концам, отклонится, свидетельствуя о протекании тока. Этот ток называют термoeлектрическим, а электродвижущую силу — термоэлектродвижущей.

Место соединения двух проводников представляет собой спай термоэлемента. Любой преобразователь имеет два спая: один —

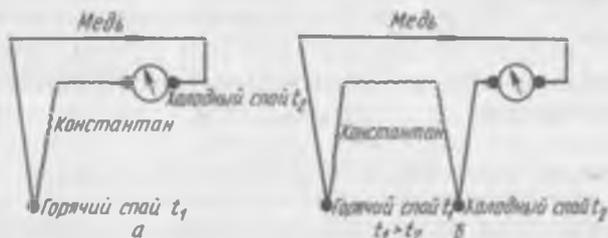


Рис. 2.12. Варианты установки термоэлектрических преобразователей:

а — первый; б — второй

в месте спая двух разных проводников, второй — в месте присоединения константанового провода к медной клемме измерительного прибора.

### Методика проведения испытания

Для проведения работы монтируют экспериментальную установку и оснащают ее необходимой контрольно-измерительной аппаратурой. Измерительный прибор будет показывать отклонение только в том случае, если температура спаев разная. Тот спай преобразователя, который помещают в измеряемую среду, называют горячим, а другой — холодным.

Если горячий спай поместить в среду с определенной температурой, то возникнет термоэлектродвижущая сила — ток пойдет в направлении от меди к константану. В месте холодного спаев (клемма гальванометра) под действием температуры окружающей среды тоже разовьется термоэлектродвижущая сила, которая стремится вызвать ток в противоположном направлении. Следовательно, гальванометр будет показывать разность между термоэлектродвижущей силой горячего и холодного спаев. Если температура их одинакова, стрелка гальванометра не отклонится.

Таким образом, чтобы зафиксировать температуру, измеряемую термоэлектрическим преобразователем, необходимо знать температуру холодного спаев. Желательно, чтобы она была постоянной во время работы. С этой целью в цепь вводят второй преобразователь холодного спаев так, чтобы медный провод ее был присоединен к клемме гальванометра, а константановый — к константановому проводу горячего спаев. Холодный спай помещают в среду с постоянной температурой (тающий лед).

Прежде чем пользоваться гальванометром для определения температуры, необходимо построить тарировочную кривую, т. е. кривую зависимости между показаниями гальванометра и температурой, записывая одновременно показания гальванометра и температуру среды (по контрольному термометру), в которую помещена термопара.

Если при пользовании термопарами температура холодного спаев отличается от ее значения, полученного при тарировке, необходимо ввести поправку. Если температура холодного спаев  $t_{xc}$  в опыте выше, чем при тарировке, то к найденному по кривой значению температуры нужно прибавить эту разницу. Если она ниже, чем при тарировке, то от найденной по кривой температуры нужно отнять эту разницу.

В образце установлены пять датчиков симметрично относительно центра пластины ( $R = 20$  мм):

№ 1 — на одной поверхности пластины;

№ 2 — на расстоянии  $x = 10$  мм от центра;

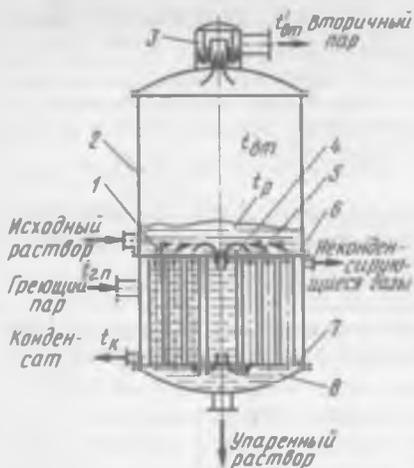


Рис. 2.13. Схема циркуляционного выпарного аппарата:

1 — паровая камера; 2 — соковая камера; 3 — ловушка (сепаратор); 4 — циркуляционная труба; 5 — кипятильные трубки; 6 — верхняя трубная решетка; 7 — нижняя трубная решетка; 8 — сиропная камера

жидкости по пути: подъемные трубки → паровое пространство → опускная труба → подъемные трубки и т. д. При такой циркуляции повышается коэффициент теплоотдачи со стороны кипящей жидкости и ухудшаются условия для образования накипи на поверхности трубок. Иногда на практике в результате разного обогривания пучка кипятильных трубок часть их может работать как опускные, что снижает производительность аппарата.

Для естественной циркуляции требуются два условия: 1) достаточная высота уровня жидкости в опускной трубе, чтобы уравновесить столб парожидкостной смеси в кипятильных трубках и сообщить этой смеси необходимую скорость; 2) достаточная интенсивность парообразования в кипятильных трубках, чтобы парожидкостная смесь имела возможно малую плотность. При недостаточном уровне жидкости в циркуляционной трубе парожидкостная смесь не может подняться до верха кипятильных трубок; при этом не происходит циркуляция, и работа аппарата сопровождается резким снижением производительности и быстрым покрытием трубок накипью. С повышением уровня жидкости возрастает скорость циркуляции и увеличивается коэффициент теплопередачи. Однако возрастание коэффициента теплопередачи происходит лишь при повышении уровня до некоторой определенной величины (оптимальный уровень), соответствующей

брасывается над верхней трубной решеткой и, отделившись от вторичного пара, опускается по циркуляционной трубе к входу в кипятильные трубки. Свежий раствор подается над верхней трубной решеткой; сгущенный раствор проводится снизу. Вторичный пар заполняет соковую камеру, откуда отводится через ловушку 3, задерживающую брызги раствора.

Естественная циркуляция возникает в замкнутой системе, состоящей из опускной (циркуляционной) трубы и подъемных (кипятильных) трубок. В подъемных трубках при кипении образуется парожидкостная смесь, плотность которой меньше плотности самой жидкости, вследствие чего происходит упорядоченное движение (циркуляция) кипящей

шей покрытию кипяtilьных трубок по всей их высоте парожидкостной смесью.

При дальнейшем повышении уровня коэффициент теплопередачи несколько снижается, так как вследствие возрастания давления внизу кипяtilьных трубок жидкость начинает кипеть не в нижней части, а немного выше. Оптимальный уровень жидкости повышается с понижением разности температур и увеличением вязкости раствора и находится опытным путем. Оптимальный уровень обычно составляет от  $1/4$  до  $3/4$  высоты кипяtilьных трубок в зависимости от концентрации раствора, причем увеличивается с ее возрастанием. Предварительно высота оптимального уровня

$$l_{\text{опт}}/H = 0,26 + 0,014(\rho - \rho_n). \quad (2.61)$$

где  $H$  — высота кипяtilьной трубки, м;  $\rho$  и  $\rho_n$  — плотность соответственно раствора и воды,  $\text{кг/м}^3$ .

Скорость циркуляции  $v_0$  определяется в зависимости от отношения  $l_{\text{опт}}/H$  по рис. 2.14. Кратность циркуляции

$$Z = G_{\text{н.р.}}/G, \quad (2.62)$$

где  $G_{\text{н.р.}} = \frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4} n v_0 \rho$  — расход циркулирующего раствора,  $\text{кг/с}$ ;  $G$  — расход свежего раствора через аппарат,  $\text{кг/с}$ ;  $d_{\text{вн}}$  — внутренний диаметр кипяtilьной трубки, м;  $n$  — число кипяtilьных трубок.

Расход греющего пара в выпарном аппарате

$$D_{\text{гр}} = U \frac{i - c d_s}{i'' - i'} + S_n c_n \frac{i_n - i_n}{i'' - i'} + \frac{Q_{\text{пот}}}{i'' - i'}, \quad (2.63)$$

где  $U$  — количество выпаренной воды,  $\text{кг}$ ;  $S_n$  — количество поступающего раствора,  $\text{кг}$ ;  $Q_{\text{пот}}$  — потери теплоты в окружающую среду,  $\text{Дж}$ ;  $i'$ ,  $i''$ ,  $i$  — энтальпии соответственно греющего пара, конденсата и вторичного пара,  $\text{Дж/кг}$ ;  $i_n$ ,  $i_n$  — начальная и конечная температура раствора,  $\text{К}$ ;  $c_n$ ,  $c_n$  — удельная теплоемкость соответственно воды и поступающего раствора,  $\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ .

Приняв, что исходный раствор поступает на выпаривание при температуре кипения и тепловые потери отсутствуют, найдем теоретический расход пара при однократном выпаривании.

Теоретически необходимый расход греющего пара в выпарном аппарате (в  $\text{кг/кг}$  выпаренной воды)

$$D_{\text{гр}} = U \frac{i - c d_s}{i'' - i'}. \quad (2.64)$$

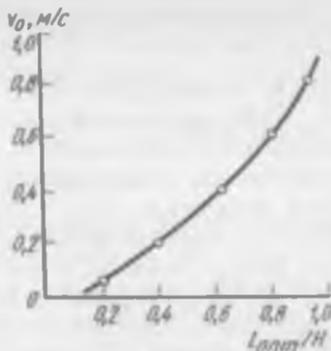


Рис. 2.14. График зависимости скорости циркуляции раствора от величины отношения оптимального уровня наполнения кипяtilьной трубки к ее высоте

Отсюда теоретический удельный расход пара

$$d_r = D_{rp}/U. \quad (2.65)$$

В среднем  $d_r = 1,04$ .

Действительный расход греющего пара на 1 кг выпариваемой воды несколько выше за счет тепловых потерь и в среднем характеризуется следующими данными (в кг): в однокорпусной выпарной установке 1,1, в двухкорпусной 0,57, в трехкорпусной 0,4, в четырехкорпусной 0,3, в пятикорпусной 0,27.

Для установок циркуляционного типа, применяемых в пищевой промышленности, не рекомендуется применять более пяти корпусов. Это объясняется невозможностью увеличения температуры кипения в первом корпусе сверх допустимой, что влечет необратимые изменения в растворе (карамелизация сахара, денатурация белков, разложение витаминов, ферментов и т. д.). Минимальная температура кипения в последнем корпусе зависит от экономически оправданной величины разрежения, которое может обеспечить конденсационная установка. Обычно для пищевой промышленности температура греющего пара первого корпуса не превышает 140°C, а вторичного пара последнего корпуса 50°C. Принимая для аппаратов циркуляционного типа полезную разность температур в корпусе  $\Delta t_n = 10^\circ\text{C}$  и учитывая температурные потери между корпусами, получим, что при данном перепаде температур целесообразно установить лишь пять корпусов.

Вторичный пар, образующийся в каждом корпусе, можно частично отводить в сторону и использовать для предварительного подогревания раствора, поступающего на выпаривание, или на другие технологические цели, не связанные с выпариванием. Отводимый в сторону вторичный пар называется экстрапаром. Преимущество отбора заключается в том, что возрастание расхода греющего пара при отборе экстрапара меньше количества отбираемого экстрапара. Так, в четырехкорпусной выпарной установке на отбор из первого корпуса 1 кг экстрапара затрачивается 0,75 кг греющего пара, а на отбор из второго и третьего корпусов — соответственно 0,5 и 0,25 кг. Поэтому целесообразнее отбирать экстрапар не из первых, а из последующих корпусов. Из последнего корпуса вторичный пар направляется в конденсатор.

### Цель работы

1. Практическое ознакомление с устройством и работой трехкорпусной выпарной установки.
2. Экспериментальное определение удельного расхода греющего пара для всей установки и сравнение его с удельным расходом пара в каждом корпусе.

3. Определение коэффициентов теплопередачи для каждого корпуса.

4. Определение потерь теплоты в окружающую среду в каждом корпусе.

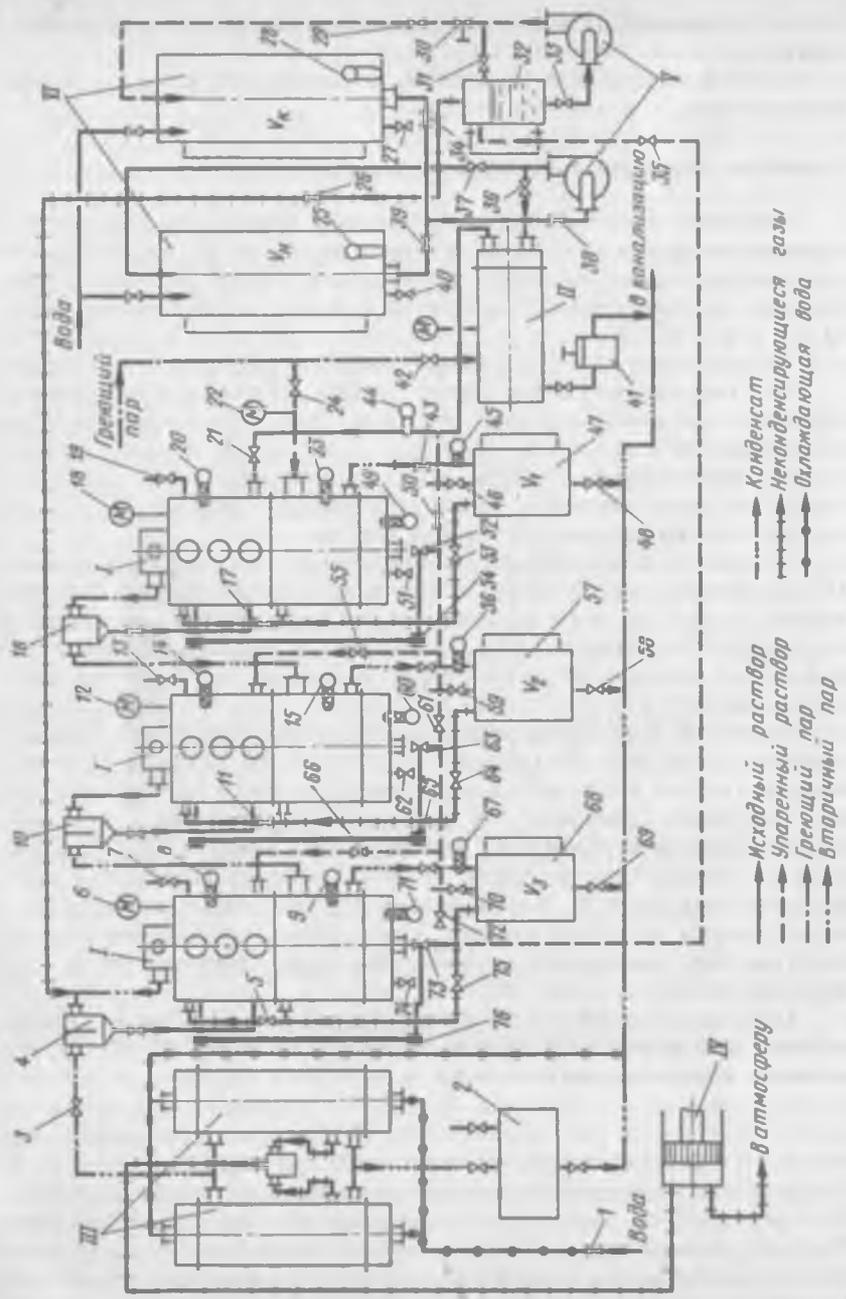
### Описание экспериментальной установки

Многокорпусная выпарная установка (рис. 2.15), на которой проводится работа, состоит из трех корпусов *I*, подогревателя раствора *II* перед выпарной установкой, поверхностных конденсаторов *III*, поршневого вакуум-насоса *IV*, центробежных насосов *V* для подачи раствора в выпарную установку и откачивания его из нее, сборников *VI* для исходного и упаренного растворов.

Каждый корпус представляет собой вертикальный циркуляционный выпарной аппарат (см. рис. 2.13). Установка собрана из одинаковых корпусов, имеющих следующие характеристики: число кипяtilьных трубок  $n = 55$ ; диаметр труб  $d_{\text{вн}}/d_{\text{нар}} = 30/33$  мм; диаметр циркуляционной трубы  $D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}} = 102/108$  мм; длина трубок  $l = 400$  мм.

Раствор, подвергающийся выпариванию, из сборника подается насосом во внутреннюю трубу кожухотемпериатурного подогревателя и, пройдя последовательно по всем трубам, нагревается до требуемой температуры. Количество исходного раствора определяется по водомерному стеклу сборника, температура раствора измеряется стеклянным термометром 25, а его концентрация определяется рефрактометром (проба отбирается через вентиль-пробоотборник 40). Подогретый раствор через вентиль 21 поступает в трубки греющей камеры первого корпуса. Температура поступающего раствора определяется стеклянным термометром 44. Частично упаренный раствор через вентили 52 и 55 попадает во второй корпус. Здесь из него также выпаривается часть растворителя (воды), и оставшийся раствор через вентили 63 и 66 переходит в третий корпус. После третьего корпуса упаренный раствор выводится из аппарата через вентили 35 и 73 в промежуточный сборник 32.

Для определения температуры кипения раствора в каждом корпусе предназначены термометры сопротивления 49, 60, 71. Изменение концентрации раствора по корпусам определяют взятием пробы через пробоотборники 54, 65, 76. Уровень наполнения аппарата раствором контролируют по водомерным стеклам на корпусах. В промежуточном сборнике 32 при помощи вентили 26 создают давление, как в соковом пространстве третьего корпуса, поэтому раствор самотеком перетекает из корпуса в сборник. Так как разрежение в сборнике может быть больше допустимой высоты всасывания насоса, в схеме перекачивания упаренного раствора в сборник дополнительно установлены вентиль 31 и об-



в атмосферу

в конденсацию

в воду

ратный клапан 30. В момент пуска насоса клапан 31 открыт полностью, поэтому под действием установившегося столба раствор поступает в насос. При частичном закрытии клапана 31 и открытии клапана 29 часть раствора циркулирует через промежуточный сборник, а оставшаяся часть поступит в сборник упаренного раствора. Обратный клапан предотвращает подсос воздуха через сливную трубу в систему.

Установка может работать также по принципу параллельного питания корпусов при однократном наполнении их и выпаривания раствора в них до требуемой концентрации. В этом случае раствор из подогревателя подается в корпус через клапаны 50, 61, 72 и 52, 63, 73.

Греющий пар для обогрева первого корпуса и подогревателя раствора из котельной через клапаны 24 и 21 поступает в нагревательные камеры аппаратов. Давление пара определяют по манометру 22.

Конденсат греющего пара из греющей камеры выпарного аппарата через клапан 43 стекает в мерник для конденсата 47, где его количество определяют по водомерному стеклу. Конденсат из подогревателя через конденсатоотводчик уходит в канализацию. Неконденсирующиеся газы из греющей камеры и мерника конденсата через клапан 17 отводятся в надсоковое пространство аппарата. Температура греющего пара определяется термометром сопротивления 23, а температура конденсата — термосопротивлением 45.

Вторичный пар, образующийся при выпаривании раствора в корпусах, пройдя через сепараторы 16 и 10, поступает в греющие камеры второго и третьего корпусов. Из третьего корпуса вторичный пар через сепаратор 4 и клапан 3 поступает в межтрубное пространство поверхностного конденсатора, соединенного с вакуум-насосом. Для конденсации вторичного пара в трубное пространство конденсатора через клапан 1 подается охлаждающая вода. Вакуум-насос откачивает в атмосферу неконденсирующиеся газы. Температура вторичного пара определяется термометрами сопротивления 8, 14, 20, а его давление — манометрами 6, 12, 18. Конденсат из греющих камер второго и третьего корпусов стекает в сборники 57 и 68, его температура определяется термометрами сопротивления 56 и 67.

---

Рис. 2.15. Схема экспериментальной трехкорпусной выпарной установки: 1, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 21, 24, 26, 27, 29, 30, 31, 33—40, 42, 43, 46, 48, 50—53, 55, 58, 59, 61—64, 66, 69, 70, 72—75 — клапаны; 2, 4, 10, 16 — сепараторы; 6, 12, 18, 22 — манометры; 8, 9, 14, 15, 20, 23, 45, 49, 56, 60, 67, 71 — термометры сопротивления; 25, 28, 44 — термометры; 32 — сборник; 41 — конденсатоотводчик; 47, 57, 68 — мерники для конденсата; 54, 65, 76 — указатели уровня раствора; I — выпарные аппараты; II — подогреватель раствора; III — поверхностные конденсаторы; IV — вакуум насос; V — центробежные насосы; VI — сборники для исходного и упаренного растворов

Воздушные вентили 7, 13, 19 позволяют соединить соковое пространство корпусов с атмосферой. Краны 5, 11, 17 служат для удаления неконденсирующихся газов из греющих камер аппаратов.

### Методика проведения испытания

Перед началом испытания установку готовят к пуску. Поскольку необходимым условием работы многокорпусной выпарной установки является перепад давлений в греющей камере и надсоковом пространстве, необходимо выбрать соответствующий режим работы установки. Рекомендуется следующий режим работы по давлению в соковом пространстве:

I корпус — давление 1—1,2 атм  $[(1—1,2) \cdot 10^5 \text{ Па}]$ ;

II корпус — разрежение 200—450 мм рт. ст.  $[(0,73—0,45) \times 10^5 \text{ Па}]$ ;

III корпус — разрежение 600—650 мм рт. ст.  $[(0,18—0,12) \times 10^5 \text{ Па}]$ .

Затем производят предварительное подогревание раствора в подогревателе. Для этого открывают вентили 21, 39, 38, 36. Через вентиль 42 подают греющий пар в подогреватель и продувают конденсатоотводчик 41 подогревателя. Температуру подогретого раствора регулируют количеством пара, подаваемого через вентиль 42, и определяют термометром 44.

В процессе работы температура подогретого раствора на выходе из подогревателя должна соответствовать начальной температуре кипения в первом корпусе.

При достижении раствором на выходе из подогревателя температуры кипения корпуса I закрывают вентиль 21 и открывают вентили 50, 61, 72 и 52, 63, 73 на всех корпусах для заполнения их раствором до отметок на водомерных стеклах. Далее создают принятый режим работы установки: закрывают вентили 7, 13, 19 на корпусах, включают вакуум-насос, подают охлаждающую воду в конденсатор, полностью открывают вентиль 3, благодаря чему соковое пространство корпуса III соединяется с конденсатором и вакуум-насосом и в корпусе создается разрежение, величину которого регулируют вентилем 3.

Для отвода неконденсирующихся газов из греющих камер аппаратов служат вентили 5, 11, 17, которые все время работы должны быть приоткрыты. Этими вентилями можно пользоваться для регулирования давления в корпусах. Вентили 51, 62, 74 служат для промывки корпусов.

После подготовки начинают испытание установки. С этой целью в греющую камеру корпуса I через вентиль 21 подают греющий пар, открывают вентили 43, 53, 64, 75 и закрывают вентили 46, 48, 58, 59, 63, 69, 70. Избыточное давление (по маномет-

Протокол № 1

Номер замера	Продолжительность замера, мин	Давление, МПа				Температура, °С											
		греющего пара корпуса I		вторичного пара корпуса II		корпус I			корпус II			корпус III					
		греющего пара корпуса I	вторичного пара корпуса II	вторичного пара корпуса I	вторичного пара корпуса II	вторичного пара											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0																
2	4																
3	8																
4	12																
5																	
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	

Средние значения измеренных величин

Номер замера	Температура раствора после приготовления	Температура раствора после приготовления, °C	Температура упаренного раствора, °C	Концентрация сухих веществ в растворе, %					Объем в мерниках, л				
				исходном	упаренном	после корпуса	после корпуса	после корпуса	исходного раствора	упаренного раствора	конденсата корпуса I	конденсата корпуса II	конденсата корпуса III
1	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10

Общие значения величин

ру 22) греющего пара устанавливают по указанию преподавателя.

Момент включения самопишущего моста является началом испытания. С этого момента в течение всего испытания через каждые 4 мин измеряют и записывают в протокол испытания № 1 значения указанных в нем величин. Через каждые 8 мин измеряют и записывают в протокол испытания количество исходного и упаренного растворов в сборниках VI и концентрацию раствора по корпусам и в сборниках.

После закипания раствора в корпусе III (определяют по разнице температуры раствора между очередными замерами не более 1°C) открывают вентили 21, 55, 66 и 52, 63, 73 на корпусах, включают насос для перекачивания упаренного раствора и открывают вентиль 29 так, чтобы уровень раствора в промежуточном сборнике 32 оставался постоянным.

После установления постоянной концентрации раствора на выходе из корпусов при помощи вентиля 21, 55, 66 и 52, 63, 73 по водомерному стеклу устанавливают оптимальный уровень наполнения кипяtilьной трубки. Величину оптимального уровня подсчитывают по уравнению (2.61).

При параллельном питании корпусов вентили 21, 50, 52, 55, 61, 63, 66, 72, 73 во время работы закрыты, насосы V не работают.

Вместо уровня раствора в сборниках в протокол испытания № 1 записывают уровень раствора в водомерных стеклах на корпусах. Работу можно производить как с подогреванием раствора перед выпарной установкой, так и без него.

Испытание заканчивают по указанию преподавателя. По окончании испытания включают насос для подачи исходного и откачивания упаренного растворов, закрывают вентили 29 и 39; прекращают подачу греющего пара, закрывают вентили 24 и 42; выключают вакуум-насос, закрывают вентиль 1 подачи воды в конденсатор; открывают вентили 7, 13, 19 для сообщения корпусов с атмосферой и вентили 48, 58, 69 на мерниках конденсата.

### Обработка результатов испытания

Обработку результатов испытания проводят по средним значениям величин из протокола № 1 для установившегося режима, т. е. после достижения постоянной концентрации раствора на выходе из корпусов. При работе установки с параллельным питанием обработку результатов начинают с момента закипания раствора в третьем корпусе.

**Определение удельного расхода греющего пара.** Удельный расход греющего пара для всей установки (в кг/кг)

$$d = D_{rp1}/U, \quad (2.66)$$

где  $D_{грn}$  — расход греющего пара в корпусе  $n$ , кг (определяется по количеству конденсата  $V$ );  $U$  — количество выпаренной воды, кг.

Расход греющего пара в  $n$ -м корпусе (в кг)

$$D_{грn} = V_n \rho_n, \quad (2.67)$$

где  $\rho_n$  — плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup> (определяют по средней температуре конденсата в  $n$ -м мернике, см. приложение 2);  $V_n$  — количество конденсата в  $n$ -м мернике, м<sup>3</sup>.

Количество выпаренной воды для всей установки (в кг)

$$U = V_n \rho_n - V_n \rho_n, \quad (2.68)$$

где  $V_n$  — количество исходного раствора в сборнике, м<sup>3</sup>;  $V_n$  — количество упаренного раствора в сборнике, м<sup>3</sup>;  $\rho_n$ ,  $\rho_n$  — плотность раствора соответственно начальная и конечная, кг/м<sup>3</sup> (определяется по соответствующим значениям температуры и концентрации сухих веществ в растворе, приведенным в приложении 7).

Для установки с последовательным питанием корпусов количество воды, выпаренной по корпусам (в кг)

$$\left. \begin{aligned} U_I &= V_n \rho_n (1 - b_n/b_I); \\ U_{II} &= \frac{V_n \rho_n b_n}{b_I} (1 - b_I/b_{II}); \\ U_{III} &= \frac{V_n \rho_n b_I}{b_{II}} (1 - b_{II}/b_{III}), \end{aligned} \right\} \quad (2.69)$$

где  $b_n$  — начальная концентрация сухих веществ в растворе в сборнике, %;  $b_I$ ,  $b_{II}$ ,  $b_{III}$  — средняя концентрация сухих веществ в растворе после I, II и III корпусов, %.

Удельный расход греющего пара для  $n$ -го корпуса (в кг)

$$d_n = D_{грn}/U_n. \quad (2.70)$$

Для установки с параллельным питанием корпусов количество выпаренной воды во всей установке (в кг)

$$U = \sum_1^n U_n = U_I + U_{II} + U_{III}, \quad (2.71)$$

где  $U_I$ ,  $U_{III}$  — количество воды, выпаренной в I, II и III корпусах, кг.

Количество воды, выпаренной в  $n$ -м корпусе (в кг)

$$U_n = (V_{nn} - V_{nk}) \rho_n, \quad (2.72)$$

где  $V_{nn}$ ,  $V_{nk}$  — начальное и конечное количество раствора в  $n$ -м корпусе, м<sup>3</sup> (определяется по водомерному стеклу на корпусе);  $\rho_n$  — средняя плотность раствора в  $n$ -м корпусе, кг/м<sup>3</sup> [определяется по средней температуре кипения и средней концентрации (см. приложение 7)].

**Определение коэффициентов теплопередачи для каждого корпуса.** Коэффициент теплопередачи для каждого корпуса установки

$$K_n = Q_n / F_n \Delta t_n, \quad (2.73)$$

где  $K_n$  — коэффициент теплопередачи при выпаривании в  $n$ -м корпусе, Вт/(м<sup>2</sup> × К);  $Q_n$  — количество теплоты, израсходованное на выпаривание в  $n$ -м корпусе, Вт.

$$Q_n = \frac{V_{\text{пар}}(\rho_n i_n'' - i_n')}{\tau}, \quad (2.74)$$

здесь  $V_{\text{пар}}$  — количество конденсата в  $n$ -м мернике, м<sup>3</sup>;  $\rho_n$  — плотность конденсата в  $n$ -м мернике, кг/м<sup>3</sup>;  $i_n''$ ,  $i_n'$  — энтальпия пара и конденсата в  $n$ -м корпусе, Дж/кг (определяется по средней температуре пара в греющей камере и конденсата по приложению 1);  $\tau$  — продолжительность опыта при установившемся режиме, с;  $\Delta t_n$  — полезная разность температур в  $n$ -м корпусе, °С.

$$\Delta t_n = t_{\text{гр}n}^{\text{ср}} - t_{\text{кн}n}^{\text{ср}},$$

где  $t_{\text{гр}n}^{\text{ср}}$  — средняя температура греющего пара в  $n$ -м корпусе, °С;  $t_{\text{кн}n}^{\text{ср}}$  — средняя температура кипения в  $n$ -м корпусе, °С;  $F_n$  — площадь поверхности нагрева греющей камеры  $n$ -го корпуса, м<sup>2</sup>.

$$F_n = \pi l(d_{\text{ср}n} + D_{\text{ср}}),$$

здесь  $l$  — длина кипяточных трубок греющей камеры, м;  $n$  — число трубок;  $d_{\text{ср}}$ ,  $D_{\text{ср}}$  — средний диаметр соответственно кипяточной и циркуляционной трубок.

**Определение потерь теплоты в окружающую среду в каждом корпусе.** Приняв, что раствор поступает на выпаривание в корпус при температуре кипения, потери теплоты в окружающую среду (в %)

$$q_n = \frac{(d_n - d_{\text{тн}}) \cdot 100}{d_n},$$

где  $d_n$  — действительный удельный расход пара в  $n$ -м корпусе;  $d_{\text{тн}}$  — теоретический удельный расход пара в  $n$ -м корпусе.

$$d_{\text{тн}} = \frac{i_n - c_{\text{вн}} i_{\text{кн}n}^{\text{ср}}}{i_n'' - i_n'},$$

где  $i_n$  — энтальпия вторичного пара в  $n$ -м корпусе, Дж/кг (определяется по средней температуре вторичного пара, см. приложение 1);  $c_{\text{вн}}$  — удельная теплоемкость воды в  $n$ -м корпусе, Дж/(кг · К) (определяется по средней температуре кипения раствора, см. приложение 2).

Результаты расчета вносят в протокол № 2.

#### Протокол № 2

Расход греющего пара, кг	Количество выпаренной воды, кг			Удельный расход пара, кг/кг			Потери теплоты в окружающую среду, %			Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> · К)		
	во всей установке	в корпусе I	в корпусе II	в корпусе III	во всей установке	в корпусе I	в корпусе II	в корпусе III	в корпусе I	в корпусе II	в корпусе III	

## Вопросы для самопроверки

1. С какой целью применяется выпаривание растворов?
2. Как устроен циркуляционный выпарной аппарат?
3. Как изменяются свойства раствора при выпаривании?
4. С какой целью применяется многокорпусная выпарная установка?
5. Из каких элементов состоит многокорпусная выпарная установка?
6. Какое условие необходимо для работы многокорпусной выпарной установки?
7. Как осуществляется циркуляция раствора в выпарном аппарате?
8. На что затрачивается энергия греющего пара, поступающего в выпарной аппарат?
9. Как производится удаление неконденсирующихся газов из греющих камер выпарной установки?
10. С какой целью необходимо отводить из греющих камер неконденсирующиеся газы?
11. Как влияет высота заполнения кипятильных трубок на интенсивность кипения раствора в аппарате?
12. Какие основные факторы влияют на интенсивность процесса кипения в многокорпусной выпарной установке?
13. Какое назначение имеет в аппарате надсоковое пространство?
14. За счет чего создается разрежение в многокорпусной выпарной установке?
15. С какой целью производят подогревание раствора до температуры кипения перед подачей его в выпарную установку?
16. Как удаляется конденсат из нагревательных камер аппаратов?
17. Какие температурные потери возникают в многокорпусной выпарной установке и от чего они зависят?
18. Каким образом влияет отбор экстрапара на производительность выпарной установки?
19. Что необходимо сделать для того, чтобы уменьшить температурные депрессии в многокорпусной выпарной установке?
20. От каких основных факторов зависит удельный расход греющего пара в выпарной установке?
21. В каких случаях применяется последовательное и параллельное питание корпусов?
22. От каких основных факторов зависят потери теплоты в окружающую среду в выпарной установке?
23. Как изменяется уровень наполнения аппаратов раствором в трехкорпусной прямой выпарной установке?
24. Как влияет величина термического сопротивления загрязнений на производительность выпарной установки?
25. Как влияет температура конденсата на выходе из выпарной установки на ее производительность?
26. От каких основных факторов зависит коэффициент теплопередачи в выпарной установке?

## Список рекомендуемой литературы

- Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. — М.: Химия, 1981, том 2.—812 с.
- Процессы и аппараты пищевых производств/В. Н. Стабников, В. М. Лысянский, В. Д. Попов и др. — М.: Агропромиздат, 1985. — 503 с.
- Таубман Е. И. Выпаривание. — М.: Химия, 1982. — 328 с.

Выпаривание растворов происходит за счет подводимого извне потребного количества теплоты, передаваемого раствору через поверхность нагрева. Наиболее распространенным теплоносителем в выпарных аппаратах является насыщенный водяной пар. Это объясняется рядом его достоинств, среди которых особенно важными являются большая энтальпия, высокий коэффициент теплоотдачи, постоянная температура конденсации при данном давлении, а также возможность простого и гибкого регулирования процесса обогрева аппарата. Желательно, чтобы образующийся при выпаривании вторичный пар обладал как можно более высокой температурой и мог быть использован в производстве для обогрева разных аппаратов. Получение вторичного пара высокой температуры достигается при выпаривании раствора под избыточным давлением, но это связано с одновременной необходимостью повышения температуры греющего пара и температуры кипения самого раствора.

При сгущении растворов, чувствительных к высоким температурам, процесс выпаривания часто ведется под вакуумом, создаваемым путем конденсации вторичных паров и поддерживаемым на постоянном уровне путем удаления неконденсирующихся газов вакуум-насосом. Ведение процесса выпаривания под вакуумом обходится дороже, чем при избыточном давлении. Это связано с удорожанием самой установки вследствие применения конденсатора и вакуум-насоса, а также с увеличением расхода греющего пара вследствие повышения удельной теплоты парообразования при пониженном давлении.

Отличительная особенность аппаратов периодического действия состоит в непрерывном изменении концентрации сгущаемого раствора, поэтому процесс выпаривания протекает при переменных значениях температуры кипения, рабочей разности температур, физико-химических характеристик раствора (плотность, теплоемкость, вязкость, теплопроводность и т. д.), а следовательно, и коэффициента теплопередачи.

В выпарных аппаратах непрерывного действия сгущаемый раствор должен всегда находиться при конечной концентрации (или очень близко к ней), поэтому процесс выпаривания практически протекает в стационарных условиях, т. е. при постоянных значениях физико-химических характеристик самого раствора и параметров процесса.

Метод определения расхода теплоты и потребной поверхности нагрева при выпаривании растворов в аппаратах периодического действия не зависит от рабочего давления в них. Существенную роль в расчете расхода теплоты и потребной поверхности нагре-

ва играет лишь режим питания аппарата. На практике допустимы два разных варианта.

По первому варианту аппарат наполняется в один прием раствором и разгружается при достижении последним заданной конечной концентрации. При этом варианте питания уровень раствора в аппарате непрерывно понижается.

По второму варианту в аппарат, наполненный к началу процесса до определенного уровня, непрерывно подают раствор для поддержания постоянного уровня; при этом в конце процесса сгущенный раствор занимает объем исходного раствора. Второй вариант характеризуется постоянным уровнем раствора в аппарате.

В указанных вариантах питания аппаратов подача раствора начинается с момента закипания раствора. Следовательно, началу выпаривания предшествует нагревание залитого в аппарат раствора до температуры кипения, соответствующей начальной концентрации и выбранному рабочему давлению.

Расход теплоты на подогревание раствора до температуры кипения определяется в этих вариантах из уравнения:

$$Q_{\text{под}} = Gc(t_{\text{кипо}} - t_0) + Q_{\text{пот}},$$

где  $Q_{\text{под}}$  — подведенное количество теплоты, Дж;  $G$  — количество нагреваемого раствора, кг;  $c$  — удельная теплоемкость раствора, Дж/(кг · К);  $t_{\text{кипо}}$  — начальная температура кипения, К;  $t_0$  — начальная температура раствора, К;  $Q_{\text{пот}}$  — потери теплоты в окружающую среду и на прогревание аппарата, Дж.

Для постоянной концентрации нагреваемого раствора теплоемкость его может считаться на этой стадии процесса постоянной. Продолжительность подогревания раствора до температуры кипения (в с)

$$\tau_{\text{под}} = \frac{Gc}{k_{\text{под}}F} \ln \frac{t_{\text{гр}} - t_0}{t_{\text{гр}} - t_{\text{кипо}}}, \quad (2.75)$$

где  $F$  — площадь поверхности нагрева аппарата, м<sup>2</sup>;  $k_{\text{под}}$  — коэффициент теплопередачи в процессе подогревания, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $t_{\text{гр}}$  — температура греющего пара, К.

**Выпаривание в аппарате периодического действия.** Рассмотрим случай, когда выпаривание происходит при переменном уровне. Температура кипения  $t_{\text{кип}}$ , теплоемкость  $c$  и энтальпия выпариваемого раствора  $i_p$  непрерывно изменяются в рассматриваемом процессе и являются однозначными функциями концентрации раствора  $b$ . Энтальпия вторичного пара  $i$  является постоянной величиной, так как аппарат всегда работает под постоянным давлением. Если пренебречь потерями теплоты в окружающую среду, то количество теплоты  $dQ$ , отдаваемое теплоносителем за элементарный отрезок времени  $dt$ , должно расходоваться

на образование  $dW$  вторичного пара и изменение энтальпии выпариваемого раствора:

$$dQ = idW + d(i_p G) = i_p W + i_p dG + G di_p. \quad (2.76)$$

Так как количество сухого вещества в растворе остается постоянным при выпаривании раствора, то

$$dG/b_1 G_1 = -db/b^2, \quad (2.77)$$

где  $G_1$  и  $G$  — массовые количества исходного и сгущенного растворов, кг;  $b_1$  и  $b$  — соответствующие концентрации сухих веществ в этих растворах, %.

Располагая кривыми зависимости температуры кипения и теплоемкости раствора от его концентрации, можно построить кривую зависимости энтальпии кипящего раствора ( $i_p = ct$ ) от концентрации, после чего графическим интегрированием легко решить уравнения (2.76) и (2.77) относительно искомого расхода теплоты  $Q$ . Теплообмен через поверхность нагрева выпарного аппарата в процессе выпаривания раствора описывается уравнением:

$$dQ = kF(t_{гп} - t_{кнн})d\tau,$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи в процессе выпаривания, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Величина  $k$  непрерывно изменяется вместе с концентрацией раствора. Для расчета выпарного аппарата необходимо знать количественную зависимость  $k$  от  $b$ , которую удобнее всего выразить соответствующей кривой. При заданной поверхности нагрева выпарного аппарата продолжительность процесса выпаривания раствора можно найти из уравнения:

$$\tau = \frac{1}{F} \int_2^Q \frac{dQ}{k(t_{гп} - t_{кнн})}. \quad (2.78)$$

Зная зависимость величин  $dQ$ ,  $k$  и  $t$  от концентрации раствора, легко решить уравнение (2.78) методом графического интегрирования.

Теперь рассмотрим случай, когда выпаривание происходит при постоянном уровне. Поддержание постоянного уровня раствора в выпарном аппарате периодического действия — наиболее удобно. В этом случае объем раствора остается постоянным на протяжении всего процесса выпаривания ( $V = \text{const}$ ), а его плотность  $\rho$  и концентрация  $b$  непрерывно изменяются.

Полиный расход теплоты на выпаривание раствора в этом режиме (в Дж)

$$Q = V\rho_2[(i - i_{p,н})\frac{b_2}{b_1} - (i - i_{p,к})], \quad (2.79)$$

где  $\rho_2$  — плотность выпаренного раствора, кг/м<sup>3</sup>;  $i$  — энтальпия вторичного пара, Дж/кг;  $i_{pн}$  — энтальпия исходного раствора, Дж/кг;  $b_1$  и  $b_2$  — соответственно концентрация сухих веществ в исходном и выпаренном растворах, %;  $i_{pк}$  — энтальпия выпаренного раствора, Дж/кг.

Площадь поверхности нагрева аппарата или продолжительность процесса выпаривания определяется, как и в предыдущем случае, из уравнения (2.78).

**Выпаривание в аппарате непрерывного действия.** Непрерывная работа однокорпусного выпарного аппарата возможна лишь в том случае, когда концентрация находящегося в нем раствора поддерживается на уровне конечной концентрации. При этом важно отметить, что для стабильной и устойчивой работы аппарат должен содержать в своем объеме значительное количество раствора по сравнению с притекающим количеством исходного раствора (исключение составляют лишь пленочные выпарные аппараты).

При установившемся режиме в аппарат непрерывно притекает исходный раствор  $G_1$  и отводятся соответствующие количества вторичного пара  $W$  и сгущенного раствора  $(G_1 - W) = G_2$ . Если при этом концентрация раствора возрастает от  $b_1$  до  $b_2$  и раствор поступает в аппарат температурой  $t_0$ , расход теплоты на выпаривание с учетом расхода ее на нагревание раствора до температуры кипения (в Вт)

$$Q = c_1 G_1 (t_{кпп} - t_0) + W(i - t_{кпп}). \quad (2.80)$$

В выпарных аппаратах непрерывного действия режим теплообмена стационарный, так как коэффициент теплопередачи  $k$  и полезная разность температур  $(t_{гp} - t_{кпп})$  постоянны и не являются функциями времени.

Потребная площадь поверхности нагрева этих аппаратов (в м<sup>2</sup>) определяется из общего уравнения теплопередачи:

$$F = Q / [k(t_{гp} - t_{кпп})]. \quad (2.81)$$

### Цель работы

1. Определение производительности вакуум-выпарного аппарата при периодическом режиме выпаривания.
2. Определение производительности вакуум-выпарного аппарата при его работе в непрерывном режиме.
3. Выбор оптимального режима работы аппарата на основании полученных данных.

### Описание установки

Исследование проводят на установке (рис. 2.16), состоящей из вакуум-аппарата  $Z$  с подвесной кольцевой греющей камерой.



раствора до температуры кипения, на пол-оборота открывают вентиль 12, полностью открывают вентили 15 и 14 и закрывают вентили 18 и 16; открывают вентиль 1 и при установлении (по указанию преподавателя) постоянного давления греющего пара на манометре 2 закрывают вентиль 12; включают секундомер и записывают в протокол наблюдения начало подогревания раствора, его температуру и концентрацию, определяемую по ареометру; давление греющего и вторичного пара, температуру раствора и количество конденсата греющего пара в мернике 17 контролируют через каждые 2 мин до закипания раствора в аппарате.

При кипении раствора в аппарате осуществляют следующее: по секундомеру фиксируют продолжительность подогревания раствора до температуры кипения (при постоянном разрежении установление постоянной температуры раствора в аппарате в двух замерах считается началом кипения раствора); после начала кипения в протокол записывают давление греющего и вторичного пара, температуру раствора, количество конденсата в мернике 17 и концентрацию раствора (замеры проводят с интервалами в 15 мин в течение 1,5 ч); по истечении заданного времени закрывают вентили 1 и 10 и открывают воздушный вентиль 4.

Для удаления раствора из аппарата закрывают вентиль 19, открывают вентили 22 и 23 и включают секундомер. В протокол наблюдения записывают время опорожнения аппарата и количество упаренного раствора в мернике 21.

При заполнении мерника 7 исходным раствором открывают вентили 8, 12, 16, 19; после опорожнения мерников 17 и 21 закрывают последовательно вентили 8, 20, 19 и 18.

Регистрацию температуры осуществляют с помощью электронного самопишущего моста, лентопротяжный механизм которого включается с момента начала записи величин в протокол испытания и выключается после прекращения записи в протокол.

## Обработка результатов испытания

Обработку результатов испытания проводят по данным протокола.

**Определение производительности вакуум-аппарата при периодическом режиме выпаривания.** Продолжительность цикла работы (в ч)

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{вып}} + \tau_{\text{вак}} + \tau_{\text{загр}} + \tau_{\text{разгр}}$$

где  $\tau_{\text{нагр}}$ ,  $\tau_{\text{вып}}$ ,  $\tau_{\text{вак}}$ ,  $\tau_{\text{загр}}$ ,  $\tau_{\text{разгр}}$  — продолжительность соответственно нагревания раствора до температуры кипения, выпаривания раствора, создания разрежения, загрузки аппарата раствором, разгрузки аппарата, ч.

Производительность аппарата (в кг/ч исходного раствора)

$$G = V\rho/\tau_{\text{ц}}$$

где  $V$  — объем аппарата, м<sup>3</sup>;  $\rho$  — плотность раствора (определяется по температуре и концентрации раствора в приложении 7), кг/м<sup>3</sup>.

Продолжительность выпаривания раствора (в ч).

$$\tau_{\text{вып}} = \int_0^{Q_{\text{вып}}} \frac{dQ_{\text{вып}}}{kF(t_{\text{гр}} - t_{\text{кип ср}})}$$

Интегрирование этого уравнения проводим графическим методом. Для этого устанавливаем соотношения между количеством переданной теплоты  $Q_{\text{вып}}$ , коэффициентом теплопередачи и средней температурой кипения раствора  $t_{\text{кип ср}}$  для нескольких точек.

Коэффициент теплопередачи в данный момент времени

$$k_i = \frac{Q_{\text{вып}i}}{F(t_{\text{гр}i} - t_{\text{кип ср}i}) \tau_{\text{вып}i}}$$

где  $Q_{\text{вып}i}$  — количество теплоты, пошедшее на выпаривание за время  $\tau_{\text{вып}i}$ , Дж;  $t_{\text{гр}i}$  — температура греющего пара, °С;  $t_{\text{кип ср}i}$  — средняя температура кипения за данный промежуток времени, °С;  $F$  — площадь поверхности нагрева аппарата, м<sup>2</sup>.

Количество теплоты, пошедшее на выпаривание (в Дж)

$$Q_{\text{вып}i} = V_{\text{ст}} \rho_i r_i$$

где  $V_{\text{ст}}$  — объем конденсата греющего пара в мернике, м<sup>3</sup>;  $\rho_i$  — плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup>;  $r_i$  — удельная теплота парообразования, Дж/кг.

В начале процесса выпаривания  $Q_{\text{вып}0} = 0$ . Коэффициент теплопередачи для этого момента времени  $k_{\text{нагр}} = k_{\text{вып}0}$ .

Коэффициент теплопередачи для периода нагревания [в Вт/(м<sup>2</sup>·К)]

$$k_{\text{нагр}} = \frac{V_{0 \text{ нагр}} \rho_0 r_0}{F(t_{\text{кип}0} - t_0) \tau_{\text{нагр}}} = \frac{Q_{\text{нагр}}}{F(t_{\text{кип}0} - t_0) \tau_{\text{нагр}}}$$

где  $V_{0 \text{ нагр}}$  — объем конденсата греющего пара в мернике за время нагревания, м<sup>3</sup>;  $t_{\text{кип}0}$  — начальная температура кипения, °С;  $t_0$  — начальная температура раствора, °С.

Данные расчета вносят в протокол № 1.

Протокол № 1

Продолжительность выпаривания $\tau_{\text{вып}i}$ , ч	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5

Концентрация сухих веществ в растворе, %  
 Средняя температура кипения, °С  
 Количество теплоты, необходимое для выпаривания  $Q_{\text{вып}} \cdot 10^{-9}$ , Дж  
 Температура греющего пара  $t_{\text{гр}}$ , °С  
 Коэффициент теплопередачи  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К)

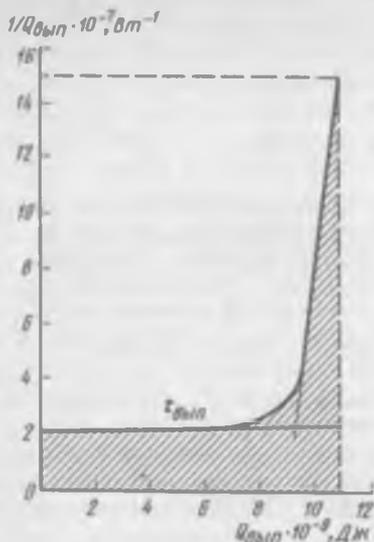


Рис. 2.17. График для определения продолжительности выпаривания

Удельный расход теплоты на концентрирование 1 кг исходного раствора:

$$q_{уд} = \frac{Q_{вып} + Q_{мл}}{W_н}$$

где  $W_н$  — количество исходного раствора,  $м^3$ .

**Выбор оптимального режима работы аппарата.** Если производительность выпарного аппарата при непрерывном режиме окажется ниже, чем при периодическом, целесообразно применить ступенчатую выпарную установку, так как при меньшей разности между начальной и конечной концентрациями раствора производительность аппаратов непрерывного действия выше производительности периодически действующих аппаратов. Кроме того, при значительном изменении концентрации в одном аппарате непрерывного действия целесообразно применить прямоточный пленочный выпарной аппарат, в котором выпаривание происходит при однократном прохождении раствора через аппарат, без циркуляции.

Используя данные протокола № 2, находим оптимальный режим работы вакуум-аппарата.

Для этого строим графическую зависимость  $V_0 = f(\tau_{вып})$  (рис. 2.18) и определяем вспомогательное время (в ч)

$$\tau_0 = \tau_{вак} + \tau_{загр} + \tau_{разгр}$$

Для определения  $\tau_{вып}$  строят график зависимости величины, обратной тепловому потоку, от количества переданной теплоты при выпаривании. Площадь, заштрихованная на рис. 2.17, соответствует продолжительности всего процесса выпаривания.

**Определение производительности вакуум-аппарата при непрерывном режиме выпаривания.** Количество теплоты, потребное для выпаривания (в Вт):

$$Q_{вып} = kF(t_{гр} - t_{кип.ср})$$

Так как для выпарных аппаратов с естественной циркуляцией концентрация раствора внутри аппарата практически равна его конечной концентрации, то коэффициент теплопередачи и средняя температура кипения соответствуют ей.

На оси  $\tau$  откладываем влево из начала координат отрезок  $OS$ , равный  $\tau_0$ . Из точки  $S$  проводим касательную к кривой  $V_0 = f(\tau_{\text{кип}})$ . Из точки касания  $A$  опускаем перпендикуляр на ось  $\tau$ . Полученный на оси  $\tau$  отрезок  $OB$  соответствует оптимальной продолжительности выпаривания в первой ступени, при которой достигается максимальная производительность по исходному раствору (в кг/ч)

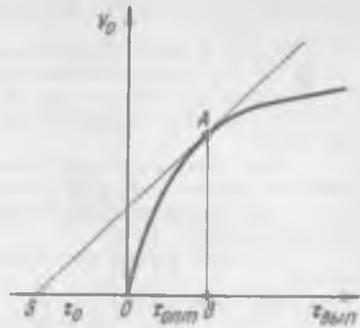


Рис. 2.18. График для определения оптимальной продолжительности выпаривания

$$G_{\text{макс}} = \frac{V_p}{\tau_0 + \tau_{\text{опт}}}$$

### Протокол № 2

- Площадь поверхности теплообмена аппарата  $F$   
 Количество исходного раствора  $W_0$   
 Количество выпаренного раствора  $W_1$   
 Продолжительность загрузки аппарата  $\tau_{\text{загр}}$   
 Продолжительность создания разрежения  $\tau_{\text{вак}}$   
 Продолжительность разгрузки аппарата  $\tau_{\text{разгр}}$

Период	№ п/п	Продолжительность процесса, ч	Температура раствора, °С	Давление греющего пара, МПа	Температура греющего пара, °С	Давление вторичного пара, МПа	Концентрация сухих веществ в растворе, %	Количество конденсата греющего пара $V_a$ , $\text{м}^3 \cdot 10^3$
--------	-------	-------------------------------	--------------------------	-----------------------------	-------------------------------	-------------------------------	--	---

Период подогрева 1 0  
 2  
 3  
 4  
 5

Период выпаривания 1 0  
 2  
 3  
 4  
 5

## Вопросы для самопроверки

1. С какой целью применяется выпаривание под вакуумом?
2. За счет чего создается разрежение в вакуум-аппарате?
3. Какие существуют режимы питания вакуум-аппарата раствором?
4. Из каких основных элементов состоит установка для выпаривания под вакуумом?
5. Как определяется продолжительность выпаривания раствора при периодическом режиме работы вакуум-аппарата?
6. Как определяется производительность вакуум-аппарата при непрерывном режиме работы?
7. В каком случае целесообразно применять ступенчатую выпарную установку?

## ПРОЦЕСС СУШКИ

Сушкой называют процесс испарения из материала жидкости, в результате чего в нем увеличивается относительное содержание сухого вещества. В большинстве случаев из материала удаляется вода, поэтому под сушкой понимают процесс его обезвоживания.

Сушка широко применяется в разных отраслях промышленности на разных стадиях технологического процесса. Очень часто сушка завершает производство.

Сушку проводят с разной целью: для облегчения и удешевления транспортирования материалов, повышения их прочности. Сушка многих пищевых продуктов обеспечивает их консервирование и хранение, а в некоторых случаях необходима для последующего измельчения материалов.

Сушка влажных материалов — сложный физико-химический процесс, в результате которого качество материала должно сохраниться или улучшиться. Поэтому выбор способа сушки определяется свойствами материала, закономерностями их изменения при удалении влаги и энергией связи влаги с материалом. Характер протекания процесса сушки (механизм процесса) зависит от форм связи влаги с материалом и его физико-коллоидных свойств.

Состояние влажного материала определяется его температурой и влажностью. Под влажностью (в %) понимают отношение массы влаги к общей массе материала

$$W = G_{вл} / G \cdot 100, \quad (2.82)$$

где  $G_{вл}$  — масса влаги в материале, кг;  $G$  — масса материала, кг.

$$G = G_c + G_{вл},$$

где  $G_c$  — масса абсолютно сухого материала, кг.

Удельным влагосодержанием (в кг/кг) материала называют отношение массы влаги к массе абсолютно сухого материала:

$$u^s = \frac{G_{вл}^s}{G - G_{вл}^s}; \quad (2.83)$$

$$u^c = G_{\text{вл}}/G_{\text{с}}. \quad (2.84)$$

Влагосодержание материала, выраженное в процентах, является отношением массы влаги к массе сухого материала:

$$W^* = \frac{G_{\text{вл}}}{G - G_{\text{вл}}} \cdot 100. \quad (2.85)$$

при равномерном распределении влаги в материале

$$W^* = 100u^c. \quad (2.86)$$

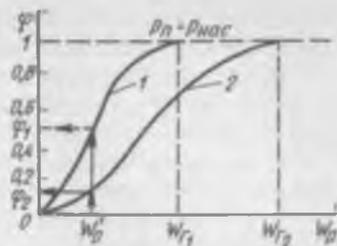


Рис. 2.19. Изотермы сорбции материалов:

1 — маглогигроскопического ( $W_{p1} > W_{p2}$ ); 2 — гигроскопического

Если влажный материал поместить во влажный воздух, то в результате их взаимодействия могут произойти два процесса:

- 1) влага из материала будет переходить в воздух, т. е. произойдет сушка, если парциальное давление пара у поверхности материала  $p_{\text{п}}$  выше парциального давления пара в воздухе  $p_{\text{п}}$ ;
- 2) влага из воздуха будет переходить в материал, т. е. материал будет увлажняться, если  $p_{\text{п}} > p_{\text{п}}$ .

Через некоторое время в результате процесса парциальные давления пара в воздухе и у поверхности материала станут равными и наступит динамическое равновесие. Влажность материала, соответствующая состоянию равновесия, называется равновесной ( $W_p$ ). Равновесная влажность зависит от свойств материала и парциального давления пара в воздухе  $p_{\text{п}}$  или его относительной влажности  $\varphi = p_{\text{п}}/p_{\text{нас}}$ , а также температуры. Эта зависимость, представленная в виде графика  $W_p = f(\varphi)$ , называется изотермой сорбции (рис. 2.19).

Из рисунка видно, что чем ниже относительная влажность воздуха, тем меньше равновесная влажность материала. Таким образом, во влажном воздухе нельзя высушить материал до абсолютного сухого состояния, а можно высушить его только до определенной равновесной влажности, соответствующей влажности воздуха.

Это положение учитывают при выборе режима длительного хранения высушенных материалов. В зависимости от влажности материала, поступающего после сушки на хранение, во избежание ее изменения выбирают и поддерживают требующуюся относительную влажность воздуха на складе. Если влажность воздуха выше влажности, соответствующей по изотерме сорбции влажности материала, при хранении в результате сорбции влаги из воздуха материал будет увлажняться.

Влажность материала, соответствующая значению  $\varphi = 100\%$ , называется максимальной гигроскопической  $W_r$ . Она характери-

зует способность материала поглощать влагу за счет сорбции пара из окружающего воздуха, т. е. его гигроскопичность.

Если оба материала (см. рис. 2.19) необходимо довести до одинаковой остаточной влажности  $W_p^*$ , то гигроскопический материал следует сушить в более сухом воздухе ( $\varphi_2 < \varphi_1$ ).

В процессе сушки происходит испарение влаги, перенос ее в виде пара с поверхности материала в окружающую среду (влагодотдача с поверхности) и перемещение влаги внутри материала (лаопрободность).

**Влагодотдача с поверхности материала (внешний тепломассообмен).** Перенос пара с поверхности материала в окружающую среду происходит в основном за счет разности парциального давления пара у поверхности материала  $p_m$  и в окружающей среде  $p_n$ . Интенсивность влагодотдачи в период постоянной скорости [в кг/(м<sup>2</sup>·ч)]

$$q_m = \alpha_m(p_m - p_n) \cdot \frac{1,01 \cdot 10^6}{p_0}, \quad (2.87)$$

где  $\alpha_m$  — коэффициент влагодобмена, кг/(м<sup>2</sup>·ч·Па);  $p_0$  — барометрическое давление, Па.

Интенсивность влагодотдачи в период убывающей скорости сушки может быть приближенно выражена через разность влагодобдержания на поверхности материала и равновесного влагодобдержания:

$$q_m = \beta \rho_0(u_n - u_p), \quad (2.88)$$

где  $\beta$  — коэффициент внешнего влагодобмена, м/ч;  $\rho_0$  — плотность сухого вещества материала, кг/м<sup>3</sup>,  $u_n$  — удельное влагодобдержание на поверхности материала, кг/кг сухого материала;  $u_p$  — равновесное влагодобдержание, кг/кг сухого материала.

**Перемещение теплоты и влаги внутри материала (внутренний тепломассоперенос).** Испарение влаги с поверхности создает перепад влагодобдержания внутри материала. Благодаря этому происходит перемещение влаги (в виде жидкости или пара) из внутренних слоев материала к его поверхности. Это явление называют влагодобпроводностью (диффузией влаги).

Интенсивность перемещения влаги (плотность потока влаги) [в кг/(м<sup>2</sup>·ч)]

$$q_{mi} = -a_m \rho_0 \frac{\partial u}{\partial n}, \quad (2.89)$$

где  $a_m$  — коэффициент массопереноса (коэффициент диффузии), м<sup>2</sup>/ч (зависит от влажности и температуры материала);  $\partial u / \partial n$  — градиент влагодобдержания, кг/(кг·м).

Знак «минус» в уравнении показывает, что направление потока влаги противоположно направлению градиента влагодобдержания.

Если при сушке внутри материала возникает значительный температурный градиент  $\partial t/\partial n$ , он существенно влияет на механизм перемещения влаги. Экспериментально доказано, что перемещение влаги внутри материала происходит не только за счет градиента влагосодержания, но и за счет градиента температуры. Это явление называют термовлагопроводностью.

За счет термовлагопроводности влага перемещается в направлении теплового потока (противоположно температурному градиенту). Интенсивность перемещения влаги за счет температурного градиента

$$q_{m1} = -a_m \rho_0 \delta \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (2.90)$$

где  $\delta$  — относительный коэффициент термовлагопроводности:  $\delta = a_m^1/a_m$  ( $a_m^1$  — коэффициент термодиффузии).

Таким образом, если внутри влажного материала существуют градиент влагосодержания  $\partial u/\partial n$  и градиент температуры  $\partial t/\partial n$ , возникают два потока влаги: поток влагопроводности  $q_{m0}$  и поток термопроводности  $q_{m1}$ . Суммарный поток влаги

$$q_m = q_{m0} \pm q_{m1}. \quad (2.91)$$

В зависимости от направления градиентов влагосодержания и температуры возникающие в материале два потока влаги могут иметь одинаковые или взаимно противоположные направления, т. е. будут либо усиливать один другой, тогда суммарный поток влаги

$$q_m = -a_m \rho_0 \frac{\partial u}{\partial n} + \left( -a_m \rho_0 \delta \frac{\partial t}{\partial n} \right) = -a_m \rho_0 \left( \frac{\partial u}{\partial n} + \delta \frac{\partial t}{\partial n} \right), \quad (2.92)$$

либо ослаблять один другой, тогда суммарный поток влаги

$$q_m = -a_m \rho_0 \frac{\partial u}{\partial n} - \left( -a_m \rho_0 \delta \frac{\partial t}{\partial n} \right) = -a_m \rho_0 \left( \frac{\partial u}{\partial n} - \delta \frac{\partial t}{\partial n} \right). \quad (2.93)$$

Если потоки влаги имеют противоположное направление, то направление суммарного потока влаги зависит от соотношений  $\partial u/\partial n$  и  $\partial t/\partial n$ . Например, при конвективной сушке в результате испарения влаги и прогрева материала с поверхности внутри материала (рис. 2.20) возникают градиент влагосодержания  $\partial u/\partial n$  от поверхности к середине материала и противоположно направленный (от середины к поверхности) температурный градиент  $\partial t/\partial n$ . При этом образуются два противоположно направленных потока влаги: вследствие влагопроводности — от середины к поверхности материала  $q_{m0}$  и вследствие термовлагопроводности — от поверхности к середине  $q_{m1}$ . Если поток, обусловленный влагопроводностью, более интенсивен, влага будет перемещаться



Рис. 2.20. Распределение влагосодержания и температуры по толщине материала в процессе конвективной сушки

в направлении уменьшения влагосодержания — от середины материала к его поверхности; термовлагопроводность будет препятствовать, уменьшать поток влаги. При небольшом температурном градиенте влиянием термовлагопроводности можно пренебречь.

Если поток термовлагопроводности больше потока влагопроводности (при большом температурном градиенте), влага будет перемещаться в направлении увеличения влагосодержания — от поверхности материала к середине; влагопроводность будет уменьшать этот поток влаги.

#### Вопросы для самопроверки

1. В чем состоит цель процесса сушки?
2. Дайте характеристику конвективной сушки.
3. Что называется влажностью и влагосодержанием материала?
4. Что такое равновесная влажность материала и от чего зависит ее значение?
5. Что называется максимальной гигроскопической влажностью материала?
6. Какие основные законы характеризуют перемещение влаги в материале?
7. Как влияет термовлагопроводность на интенсивность сушки?

#### Список рекомендуемой литературы

- Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1973. — 527 с.  
 Лыков А. В. Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 470 с.  
 Лыков А. В. Тепломассообмен. — М.: Энергия, 1978. — 480 с.

#### Работа № 6. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Технологические процессы пищевых производств (сушка продуктов, выпечка хлеба, производство конфет, печенья, макаронных изделий, брожение пива, солодоращение и др.) протекают при определенной температуре и влажности воздуха. Хранение многих пищевых продуктов также должно происходить при определенном режиме (при определенных параметрах воздуха).

В зависимости от характера технологического процесса в результате взаимодействия воздуха с материалом параметры воздуха будут изменяться: воздух будет нагреваться или охлаждаться, произойдет его увлажнение или осушка. Влажный воз-

дух представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара. Состояние влажного воздуха характеризуется его параметрами.

Барометрическое давление влажного воздуха равно сумме парциальных давлений его составляющих, т. е. сухого воздуха и пара:

$$p_0 = p_{с.в} + p_n, \quad (2.94)$$

где  $p_0$  — общее барометрическое давление влажного воздуха, Па;  $p_{с.в}$  и  $p_n$  — парциальное давление соответственно сухого воздуха и пара, т. е. давление составляющих смеси при условии, что каждая составляющая занимает объем всей смеси, Па.

Под абсолютной влажностью воздуха  $\rho_n$  понимается масса водяного пара, находящегося в  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха.

Относительной влажностью воздуха называют отношение массы водяного пара, находящегося в  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха, к максимально возможной массе его в  $1 \text{ м}^3$  воздуха при тех же барометрическом давлении и температуре:

$$\varphi = (\rho_n / \rho_{\text{max}}) \cdot 100. \quad (2.95)$$

Максимально возможное содержание пара в воздухе достигается при полном насыщении его водяным паром, т. е. при  $\rho_{\text{max}} = \rho_{\text{нас}}$ , тогда

$$\varphi = (\rho_n / \rho_{\text{нас}}) \cdot 100. \quad (2.96)$$

Применяя приближенно для влажного воздуха уравнение состояния газа, получим

$$\varphi = (\rho_n / \rho_{\text{нас}}) \cdot 100, \quad (2.97)$$

где  $\rho_n$  — парциальное давление пара в воздухе, Па;  $\rho_{\text{нас}}$  — давление пара при полном насыщении воздуха водяными парами, т. е. давление насыщенного пара, Па.

Относительная влажность воздуха характеризует способность воздуха поглощать влагу: чем она ниже (т. е. чем меньше  $\rho_n$  по сравнению с  $\rho_{\text{нас}}$ ), тем выше сушильная способность воздуха.

Давление насыщенного пара зависит от температуры (см. приложение 1): с повышением ее давление насыщенного пара увеличивается, а это вызывает уменьшение относительной влажности воздуха. Поэтому при нагревании воздуха в калориферах его сушильная способность значительно увеличивается, и наоборот, при охлаждении воздуха вследствие уменьшения  $\rho_{\text{нас}}$  относительная влажность воздуха увеличивается.

При увлажнении воздуха водяным паром парциальное давление пара  $\rho_n$  увеличивается. Это вызывает увеличение относительной влажности воздуха и снижение его сушильной способности; при полном насыщении воздуха парциальное давление пара ста-

новится равным давлению насыщенного пара  $p_n = p_{нас}$ , тогда  $\varphi = 100\%$  (так как  $p_n/p_{нас} = 1$ ).

Воздух, полностью насыщенный водяными парами ( $\varphi = 100\%$ ), не способен поглощать влагу, его сушильная способность равна нулю.

Удельным влагосодержанием влажного воздуха называется масса пара, содержащегося во влажном воздухе, отнесенная к 1 кг сухого воздуха.

Если масса пара выражается в килограммах, то удельное влагосодержание обозначается через  $x$  [в кг влаги/кг сухого воздуха]. Если масса пара выражается в граммах, то удельное влагосодержание обозначается через  $d$  [в г влаги/кг сухого воздуха]:

$$x = d/1000 = G_n/G_{с.в.}, \quad (2.98)$$

где  $G_n$  — масса пара во влажном воздухе, кг;  $G_{с.в.}$  — масса сухого воздуха, кг.

Зависимость между влагосодержанием и парциальным давлением пара выражается формулами

$$x = 0,622p_n/(p_б - p_n) \quad (2.99)$$

или

$$d = 622p_n/(p_б - p_n). \quad (2.100)$$

В этих формулах на основании формулы (2.97) можно заменить  $p_n = \varphi p_{нас}$ , тогда

$$x = 0,622\varphi p_{нас}/(p_б - \varphi p_{нас}) \quad (2.101)$$

и

$$d = 622\varphi p_{нас}/(p_б - \varphi p_{нас}). \quad (2.102)$$

Удельная энтальпия\* влажного воздуха относится к 1 кг сухого воздуха и определяется как сумма энтальпии 1 кг сухого воздуха и энтальпии пара, приходящегося в смеси на 1 кг сухого воздуха, и выражается в Дж/кг сухого воздуха:

$$i = i_{с.в.} + i_n \frac{d}{1000} \quad (2.103)$$

или

$$i = c_{с.в.}t + \frac{d}{1000}(r_0 + c_n t),$$

где  $c_{с.в.}$  — удельная теплоемкость сухого воздуха, которая может быть принята равной 1004,64 Дж/(кг·К);  $c_n$  — удельная теплоемкость пара, равная 1841,84 Дж/(кг·К);  $r_0$  — удельная теплота парообразования при 0°C, равная 2499,042 кДж/кг.

\* Точнее, удельная приведенная энтальпия влажного воздуха, отнесенная к 1 кг сухого воздуха.

Рис. 2.21. Психрометры:

а — с естественной циркуляцией воздуха;  
 б — с принудительной циркуляцией воздуха

Если влажный воздух с определенными параметрами ( $t$ ,  $\varphi$ ,  $d$ ,  $i$ ) охлаждать при постоянном количестве в нем влаги ( $d = \text{const}$ ), то при понижении температуры относительная влажность воздуха будет повышаться. Пределом охлаждения воздуха при постоянном влагосодержании является температура, при которой влажность воздуха достигнет 100%. Эта температура называется температурой точки росы  $t_p$ .

Если испарение влаги в воздух происходит только за счет теплоты воздуха, когда нет подвода и отвода теплоты извне, процесс называется адиабатным испарением. При этом температура воздуха будет понижаться, а его относительная влажность — увеличиваться. При полном насыщении воздуха ( $\varphi = 100\%$ ) температура воздуха станет равна температуре испаряющейся воды. Эта температура называется температурой мокрого термометра  $t_m$ . Таким образом, температура мокрого термометра — это температура адиабатного насыщения воздуха.

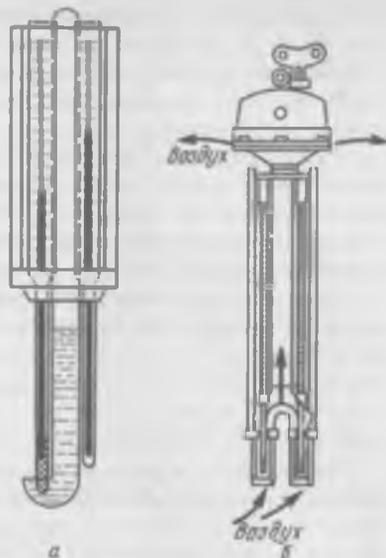
Потенциал сушки\* характеризует способность воздуха поглощать влагу и определяется разностью между температурой воздуха и температурой мокрого термометра:

$$e = t_c - t_m, \quad (2.104)$$

где  $t_c$  — температура воздуха по сухому термометру;  $t_m$  — температура мокрого термометра.

Чем больше разность между температурами сухого и мокрого термометров, тем больше потенциал сушки, выше сушильная способность воздуха и меньше его относительная влажность. При  $t_c = t_m$   $e = 0$  и  $\varphi = 100\%$ .

Для определения потенциала сушки используют прибор, называемый психрометром (рис. 2.21).



\* Потенциал сушки — понятие условное, по существу, мы имеем здесь разность потенциалов переноса теплоты.

Психрометр состоит из двух термометров: обычного сухого и смоченного. Шарик смоченного термометра обернут влажной тканью (батистом), смачиваемой водой. С поверхности ткани за счет теплоты шарика испаряется вода, поэтому показание смоченного термометра ниже, чем сухого.

Таким образом, этот термометр показывает температуру испаряющейся воды, т. е. температуру мокрого термометра. Чем больше разность между показаниями сухого и смоченного термометров (психрометрическая разность), тем интенсивнее происходит испарение, значит, воздух более сухой.

Температура смоченного термометра в психрометре несколько выше истинной температуры мокрого термометра, так как процесс испарения с ткани происходит не в адиабатных условиях. Это объясняется тем, что шарик смоченного термометра передается некоторое количество теплоты от воздуха через выступающий столбик ртути и т. п.

Эта ошибка в показании смоченного термометра может быть уменьшена, если защитить шарик от радиации, обернуть батистом и выступающий столбик ртути, увеличить скорость движения воздуха. При увеличении скорости воздуха возрастает интенсивность испарения, в связи с чем количество теплоты, затраченной на испарение влаги, будет значительно больше количества теплоты, полученной извне, и ошибка уменьшится. Как показали эксперименты, при скорости воздуха 1,5—2 м/с и температуре смоченного термометра выше 20°C ошибка составляет не более 1% психрометрической разности и ею можно пренебречь.

Для точных расчетов рекомендуется вводить поправку на показание смоченного термометра. Величина поправки (ошибки) определяется по диаграмме, построенной по экспериментальным данным (рис. 2.22). На диаграмме значение поправки дается в процентах от психрометрической разности для показаний смоченного термометра от —30 до 90°C и для скорости воздуха от 0 до 10 м/с.

Истинная температура мокрого термометра

$$t_m = t'_m - \frac{\Delta(t_m - t'_m)}{100}, \quad (2.105)$$

где  $t'_m$  — показание смоченного термометра в психрометре;  $\Delta$  — поправка, найденная по диаграмме в зависимости от показания смоченного термометра  $t'_m$  и скорости воздуха, %.

При скорости воздуха более 4 м/с поправку на показание смоченного термометра можно не вводить. Это учтено в психрометре с принудительной циркуляцией воздуха. Термометры в нем заключены в металлические трубки, через которые со значительной скоростью продувается воздух при помощи вентилятора.

По показанию психрометра (по психрометрической разности)

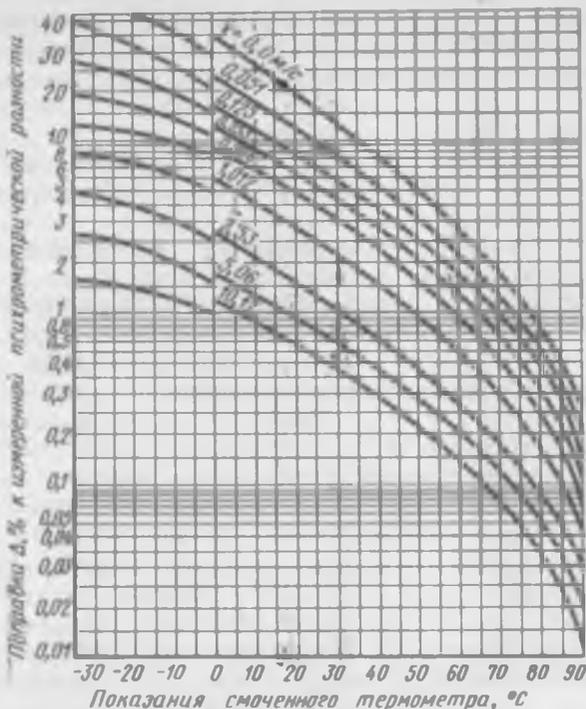


Рис. 2.22. Диаграмма для определения поправки на показания смоченного термометра

можно определить относительную влажность воздуха. Существует два способа ее определения: по психрометрической формуле и психрометрической таблице.

Психрометрическая формула для определения относительной влажности воздуха имеет вид

$$\varphi = p_m / p_{нас} - (A p_0 / p_{нас}) (t_c - t_m), \quad (2.106)$$

где  $p_m$  — давление насыщенного пара при истинной температуре мокрого термометра  $t_m$  (определяют по приложению 1), Па;  $p_{нас}$  — давление насыщенного пара при температуре сухого термометра  $t_c$ , Па (определяется по приложению 1);  $A$  — психрометрический коэффициент, зависящий в основном от скорости воздуха.

Для невысоких температур при хорошей аспирации психрометра  $A = 6,6 \cdot 10^{-4}$ . Для скорости воздуха  $v \geq 0,5$  м/с коэффициент  $A$  может быть определен по следующей формуле:

$$A = (65 + 6,75/v) \cdot 10^{-5}. \quad (2.107)$$

По показанию психрометра можно определить относительную влажность воздуха (см. приложения 4 и 5, в которых значение

относительной влажности дается в зависимости от психрометрической разности при разных значениях температуры сухого термометра и определенной скорости воздуха).

### Цель работы

1. Знакомство с методикой измерения основных параметров влажного воздуха.
2. Аналитический расчет основных параметров влажного воздуха.
3. Определение и анализ изменения основных параметров влажного воздуха в процессе нагревания.

### Описание экспериментальной установки

Определение параметров влажного воздуха проводят в лаборатории на экспериментальной сушильной установке. Сушильная установка (рис. 2.23) состоит из сушильного барабана *A*, парового калорифера *B*, вентилятора *C* и системы трубопроводов.

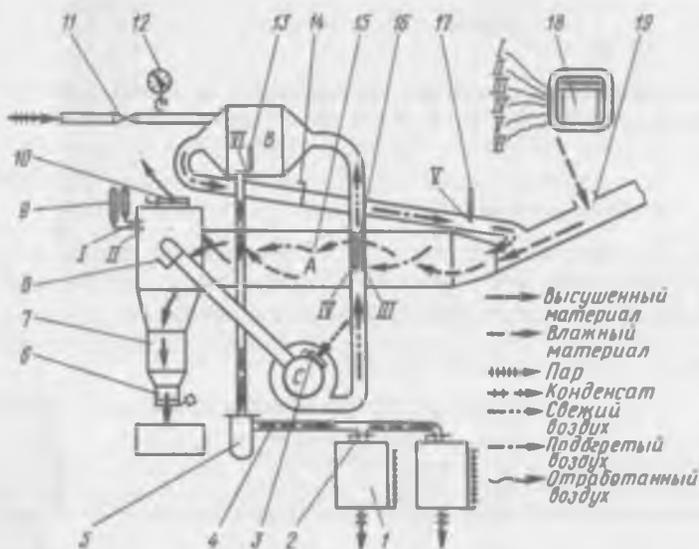


Рис. 2.23. Схема экспериментальной сушильной установки:

1 — мерник; 2 — кран; 3, 8, 10, 14 — шиберы; 4 — расходомер; 5 — конденсатоотводчик; 6 — материал; 7 — бункер; 9, 13, 17 — термометры; 11 — вентиль; 12 — манометр; 15 — патрубок; 16 — психрометр; 18 — самопишущий прибор; 19 — загрузочное устройство. Точки расположения термометров сопротивления для измерения температуры: I — отработанного воздуха по сухому термометру; II — отработанного воздуха по смоченному термометру; III — свежего воздуха по смоченному термометру; IV — свежего воздуха по сухому термометру; V — воздуха после калорифера по сухому термометру; VI — конденсата

В трубопроводах для воздуха до и после калорифера установлены сухие и смоченный термометры. Для автоматического измерения температур, необходимых для расчета параметров воздуха, установка снабжена электронным автоматическим мостом.

Для измерения параметров воздуха в помещении используют психрометры с естественной и принудительной циркуляцией воздуха. Для измерения скорости воздуха используют анемометр. Существует несколько видов анемометров. Наиболее распространены крыльчатый и чашечный.

Чашечный анемометр (рис. 2.24) состоит из нескольких легких чашек, прикрепленных к стальной оси. Ось вращается в двух алмазных подшипниках. При внесении анемометра в поток воздуха чашки вследствие давления на них струи воздуха начинают вращаться с некоторой скоростью, зависящей от скорости движения потока воздуха. При помощи особой системы вращение оси передается счетчику, который имеет три циферблата со стрелками.

Измерение скорости воздуха анемометром производят так: записывают показания счетчика анемометра по трем циферблатам: тысячи, сотни, десятки ( $n_1$ ). Затем анемометр помещают в поток воздуха (в строго горизонтальном положении), одновременно включают счетчик анемометра и секундомер. Включенный анемометр выдерживают в потоке воздуха в течение 100 с, после чего одновременно выключают счетчик и секундомер, анемометр вынимают из потока воздуха. Записывают показания счетчика анемометра по трем циферблатам ( $n_2$ ). Определяют разность между показаниями счетчика в конце и начале измерения. Полученную разность делят на время, в течение которого проводилось измерение (100 с), и находят скорость движения воздуха (в м/с):

$$v_{\text{изд}} = (n_2 - n_1) / 100.$$

Найденная таким образом скорость движения воздуха является теоретической (или индикаторной), действительная будет несколько отличаться; ее определяют по специальной тарировочной кривой анемометра.



Рис 2.24 Чашечный анемометр

Необходимым условием для правильного измерения скорости является отсутствие возмущения потока воздуха (от руки наблюдателя и т. д.).

### Методика проведения испытания

Для расчета параметров воздуха в помещении по психрометрам с естественной и принудительной циркуляцией воздуха измеряют температуру сухого  $t_s$  и смоченного  $t_w$  термометров.

Для изучения изменения параметров воздуха при нагревании проводят их определение в сушильной установке до и после кало-

Протокол испытания

Параметры воздуха	В помещении		До калорифера	После калорифера
	психрометр с естественной циркуляцией воздуха	психрометр с принудительной циркуляцией воздуха		
Температура по сухому термометру $t_s$ , °C Температура по смоченному термометру $t_w$ , °C Скорость $v$ , м/с Поправка на показание смоченного термометра $\Delta$ , % Истинная температура мокрого термометра $t_m$ , °C Потенциал сушки $\epsilon$ , °C Удельное влагосодержание $d$ , г/кг Удельная энтальпия $i$ , кДж/кг Относительная влажность $\phi$ , % Парциальное давление пара $p_m$ , МПа Давление насыщенного пара $p_{нас}$ , МПа Барометрическое давление $p_b$ , мм рт. ст.	Аналитический расчет По $i - d$ -диаграмме	Аналитический расчет По $i - d$ -диаграмме	Аналитический расчет По $i - d$ -диаграмме	Аналитический расчет По $i - d$ -диаграмме

рифера. Испытание проводят в такой последовательности: включают вентилятор *C* (см. рис. 2.23); воздух из помещения через открытый шибер *З* поступает в калорифер *B*; в калорифер через вентиль *И* подают греющий пар; по показанию психрометра *16* в воздуховоде между вентилятором и калорифером определяют температуру сухого  $t_{c0}$  и смоченного  $t'_{m0}$  термометров; подогретый воздух из калорифера при открытом шибере *14* попадает в барабан сушилки; по термометру *17* в воздуховоде после калорифера определяют температуру подогретого воздуха по сухому термометру  $t_{c1}$ ; измеряют скорость движения воздуха анемометром в воздуховоде до калорифера. Все замеры и результаты расчетов записывают в протокол испытания.

### Обработка результатов испытания

Параметры воздуха в помещении определяют в следующем порядке. По показанию психрометра с естественной циркуляцией воздуха находят поправку на показание смоченного термометра по диаграмме (см. рис. 2.22) при скорости движения воздуха, равной нулю. Находят истинную температуру мокрого термометра  $t_m$  по формуле (2.105). Найденную истинную температуру  $t_m$  термометра сравнивают с показанием смоченного термометра в психрометре с принудительной циркуляцией воздуха. По приведенным выше формулам рассчитывают основные параметры влажного воздуха: относительную влажность  $\varphi$ , удельное влагосодержание  $d$ , удельную энтальпию  $i$ , потенциал сушки  $e$ , парциальное давление пара  $p_n$ . По известным температурам  $t_c$  и  $t_m$  определяют все параметры влажного воздуха по  $i-d$ -диаграмме.

Изменение параметров воздуха при нагревании определяют в такой последовательности. По показанию смоченного термометра до калорифера  $t'_{m0}$  находят поправку на его показание при измеренной скорости движения воздуха. Определяют истинную температуру мокрого термометра  $t_{m0}$ . Рассчитывают основные параметры влажного воздуха до калорифера: относительную влажность  $\varphi_0$ , удельное влагосодержание  $d_0$ , удельную энтальпию  $i_0$ , потенциал сушки  $e_0$ , парциальное давление пара  $p_{n0}$ . По показанию сухого термометра после калорифера  $t_{c1}$  при условии постоянства удельного влагосодержания воздуха при нагревании ( $d_1 = d_0$ ) находят параметры подогретого воздуха: относительную влажность  $\varphi_1$ , удельную энтальпию  $i_1$ , потенциал сушки  $e_1$ . По показаниям сухого  $t_{c0}$ ,  $t_{c1}$  и смоченного  $t'_{m0}$  термометров определяют параметры воздуха до и после калорифера по  $i-d$ -диаграмме.

После проведения всех расчетов студент должен объяснить причину изменения параметров воздуха при его нагревании в калорифере.

### Материалы для самоподготовки

№ п/п	Элемент изучаемого материала	Характер мыслительной деятельности и цель контроля	
		при допуске к выполнению лабораторной работы	при защите лабораторной работы
1	Цель работы	Воспроизведение целей работы	
2	Абсолютная влажность	Смысл и единица измерения Величины, влияющие на абсолютную влажность	Анализ и обоснование изменения абсолютной влажности при нагревании воздуха и в процессе сушки
3	Относительная влажность	Смысл  Величины (факторы), влияющие на относительную влажность	Анализ и обоснование изменения относительной влажности при нагревании в процессе сушки Анализ влияния отдельных величин на относительную влажность
4	Формула для расчета относительной влажности	Воспроизведение формулы Смысл отдельных величин в формуле	
5	Удельное влагосодержание	Смысл и величины измерения Анализ влияния отдельных величин на удельное влагосодержание Методы измерения и расчета	Анализ и обоснование изменения удельного влагосодержания при нагревании воздуха и в процессе сушки
6	Формула для расчета удельного влагосодержания	Воспроизведение формулы Смысл отдельных величин в формуле	
7	Удельная энтальпия	Смысл и единица измерения Величины, влияющие на удельную энтальпию Анализ влияния отдельных величин на удельную энтальпию Методы измерения и расчета	Анализ и обоснование изменения удельной энтальпии при нагревании воздуха и в процессе сушки
8	Формула для расчета удельной энтальпии	Воспроизведение формулы Смысл отдельных величин в формуле	Анализ изменения отдельных составляющих в формуле в процессе сушки и при нагревании воздуха
9	Температура мокрого термометра	Смысл	Анализ и обоснование изменения температуры мокрого термометра при изменении относительной влажности
10	Температура точки росы	Смысл	

№ п/п	Элемент изучаемого материала	Характер мыслительной деятельности и цель контроля	
		при допуске к выполнению лабораторной работы	при защите лабораторной работы
11	Потенциал сушки	Смысл и единица измерения Величины, по которым определяется значение потенциала сушки Методы измерения и расчета	Анализ зависимости потенциала сушки от показаний сухого и смоченного термометров  Анализ изменения потенциала сушки при нагревании воздуха и в процессе сушки Анализ соответствия между потенциалом сушки и относительной влажностью воздуха
12	$i - d$ -диаграмма влажного воздуха	Название и смысл линий на диаграмме  Определение параметров воздуха по двум известным	Анализ (сопоставление) параметров воздуха в разных точках диаграммы
13	Схема установки	Название и назначение отдельных элементов установки Последовательность прохождения воздуха через элементы установки Приборы, их назначение и место в установке	— — —
14	Психрометры	Название типов психрометров Название и особенности элементов психрометров Причины ошибок в показаниях смоченного термометра	Анализ показаний психрометров и их зависимость от относительной влажности воздуха Анализ влияния скорости движения воздуха на величину ошибки в показаниях смоченного термометра
15	Анеометры	Факторы, влияющие на величину ошибки в показании смоченного термометра Устройство и принцип работы Методика определения скорости движения воздуха	— —
16	Методика проведения работы	Последовательность операций и измерений при выполнении работы	Анализ использования для расчетов результатов измерений при выполнении работы

№ п/п	Элемент изучаемого материала	Характер мыслительной деятельности и цель контроля	
		при допуске к выполнению лабораторной работы	при защите лабораторной работы
17	Техника безопасности	Места в установке и операции, требующие особого внимания и осторожности в работе	—

### **Работа № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**

Большинство материалов, подвергающихся сушке на пищевых предприятиях, являются коллоидными (желатин, агар, прессованное мучное тесто) или коллоидными капиллярно-пористыми (зерно, хлеб, овощи) телами. Наиболее широко применяется конвективная сушка пищевых материалов нагретым влажным воздухом, который является одновременно теплопередатчиком и влагопоглотителем и называется сушильным агентом.

#### **Цель работы**

1. Изучение процесса конвективной сушки кусковых материалов и процесса сушки сыпучих материалов при воздействии вибрации.
2. Построение по результатам испытания кривых сушки и кривых скорости сушки.
3. Анализ периодов процесса сушки на основании построенных кривых.

#### **Описание экспериментальной установки**

Процесс конвективной сушки проводят в циркуляционной сушилке (рис. 2.25).

Сушилка состоит из двух горизонтальных каналов: верхнего длиной 3 м прямоугольного сечения (300 × 300 мм) и нижнего круглого сечения, соединенных трубами через гибкие патрубки. Корпус сушилки снаружи имеет тепловую изоляцию.

Свежий воздух из помещения засасывается вентилятором 1 через электрический калорифер 2, который состоит из четырех секций. В середине верхнего канала расположена рабочая камера сушилки 3, в которой находится материал, подвергающийся сушке. Материал через дверцу камеры помещают в кассету, сое-

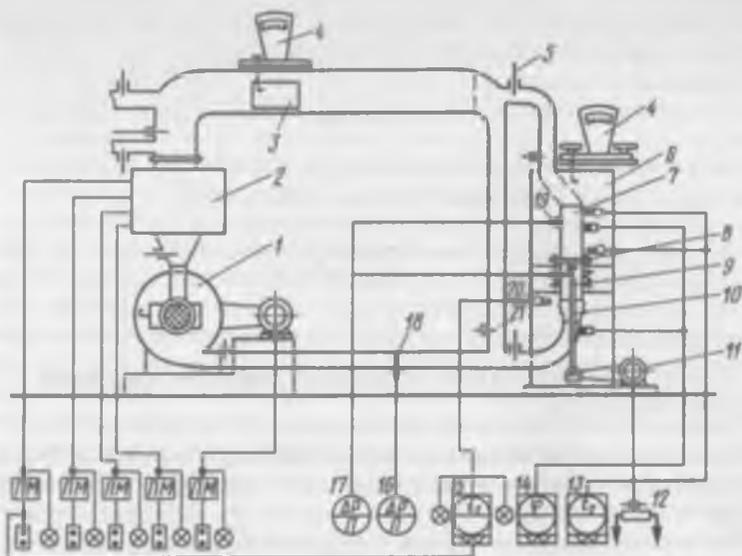


Рис. 2.25. Схема конвективной циркуляционной сушильной установки:

1 — вентилятор; 2 — калорифер; 3 — рабочая камера; 4 — весы; 5 — шибер; 6 — сушильная камера; 7 — сменные цилиндры; 8 — захваты; 9 — патрубок; 10 — тяга; 11 — электропривод; 12 — реостат; 13, 15 — потенциометры; 14 — прибор для измерения влажности воздуха; 16, 17 — микроманометры; 18 — диафрагма; 19 — пневматическая трубка; 20 — термопреобразователь; 21 — обводной канал

диненным стержнем через отверстие в корпусе сушилки с чашкой весов 4. Таким образом, в процессе сушки можно наблюдать за изменением массы материала.

Отработанный воздух после рабочей камеры может быть полностью удален или частично направлен на рециркуляцию и в смеси со свежим воздухом направлен на подогревание в калорифер.

Для исследования процесса сушки в виброкипящем слое используется сушильная камера 6, изолированная асбоцементными плитами и соединенная воздухопроводами с горизонтальными каналами. В изолированной камере расположен цилиндрический патрубок 9, который приводится в колебательное движение в вертикальной плоскости через тяги 10 и эксцентриковый вал от электропривода постоянного тока 11. Плавное регулирование частоты вращения эксцентрикового вала осуществляется с помощью регулировочного реостата 12, включенного в цепь возбуждения электродвигателя. Амплитуда колебаний регулируется от 0 до 10 мм при помощи сидящих на валу поворотных эксцентриковых втулок. На патрубке 9 закреплены специальными быстродействующими захватами 8 сменные цилиндры 7 диаметром

150 мм и высотой 350 мм, выполненные из оцинкованной жести со смотровым окном вдоль образующей цилиндра.

Патрубок 9 движется в направляющих, снабженных пружинными амортизаторами, и соединяется с воздухопроводом через мягкий рукав.

Контроль и регулирование основных параметров процесса сушки осуществляются таким образом. Температура входящего, нагретого в калорифере воздуха контролируется и регулируется при помощи малогабаритного электронного потенциометра 15, имеющего двухпозиционное регулирующее устройство. В качестве датчика используется малоинерционный хромель-копелевый термоэлектрический преобразователь 20. Пределы измерения температуры потенциометром от 0 до 200°C. Регулирующее устройство включает или выключает одну секцию калорифера мощностью 0,8 кВт.

Для измерения температуры воздуха и материала как в камере для кускового материала, так и в виброкипящем слое, а также температуры отработанного воздуха служат шеститочечные быстродействующие потенциометры 13.

Контроль относительной влажности входящего и отработанного воздуха осуществляется с помощью прибора 14, работающего в комплекте с электронным мостом переменного тока. В качестве чувствительного элемента использован калий-натриевый датчик. Диапазон измерения влажности 35—80%.

Расход воздуха измеряется при помощи диафрагмы 18 с профилем «четверть круга», позволяющим вести измерения в широких пределах изменения скорости движения воздуха от 0,3 до 6 м/с.

Перепад давления на диафрагме контролируется микроманометром 16. По микроманометру 17 измеряется перепад давления в камере и слое. При гидродинамических исследованиях для измерения перепада давления используется пневматическая трубка 19. Для контроля относительной влажности воздуха в камерах установлены обычные психрометры.

### **Методика проведения испытания**

Объектом сушки является кусковой продукт (хлеб) и сыпучий материал (увлажненное зерно).

Перед началом испытания готовят образцы: из буханки вырезают ломтик хлеба толщиной 7—10 мм или используют зерно влажностью 25—30%. Из этих же образцов в два бюкса (масса бюксов определяется заранее) берут пробы (навески по 4—5 г) для определения начальной влажности. Бюксы с пробами взвешивают и ставят на 40 мин в сушильный шкаф, температура в котором при помощи терморегулятора поддерживается равной 130°C.

После этого бюксы вынимают из шкафа и вновь взвешивают. Результаты взвешивания бюксов записывают в протокол № 1.

### Протокол № 1

Бюкс	Масса, бюкса, $G_0$ , г	Масса навески с бюксом до сушки $G_1$ , г	Масса навески с бюксом после сушки $G_2$ , г	Масса навески до сушки $g_1$ , г	Масса навески после сушки $g_2$ , г	Масса влаги в навеске до сушки $G_{вл}$ , г	Влажность навески $W_0$ , % к массе СВ	Средняя влажность материала $W_{ср}$ , % к массе СВ

Установку готовят к испытанию: включают сначала вентилятор, затем калорифер, устанавливают заданный расход воздуха, включают систему контроля и автоматического регулирования. Установка считается готовой к испытанию, когда в ней обеспечивается стационарный режим, т. е. достигаются определенные температура и влажность воздуха до рабочей камеры.

Приготовленный образец взвешивают на технических весах, определяя массу влажного материала  $G_1$ . Образец кускового материала вставляют в кассету, которую быстро подвешивают к тяге весов в рабочей камере сушилки. Образец должен быть расположен вертикально и параллельно потоку воздуха. Момент помещения материала в сушильную камеру является началом процесса сушки, т. е. началом испытания (время начала регистрируется в протоколе № 2).

### Протокол № 2

Объект сушки

Масса влажного образца  $G_1$

Начальная влажность материала  $W_0$

Сухая масса образца  $G_2$

Начало испытания

Конец испытания

Продолжительность сушки

Режим сушки

Время между замерами $\Delta t$ , мин	Время от начала испытания		Убыль массы $\Delta G$ , г	Масса образца $G$ , г	Масса влаги $G_{вл}$ , г	Влажность образца $W$ , %	Температура воздуха до калорифера, °C	Температура воздуха перед сушильной камерой, °C	Температура воздуха после сушильной камеры, °C	Примечание
	ч	мин								

При исследовании процесса сушки сыпучих материалов последние (увлажненное зерно) взвешивают на технических весах и засыпают в предварительно взвешенный сменный цилиндр, который при помощи тяги подвешивают к весам. Весы уравнивают. Исходную массу материала фиксируют в протоколе № 2 (массу сменного цилиндра вычитают из показаний весов).

Цилиндр отсоединяют от тяги весов и фиксируют на патрубке быстродействующими захватами. Затем включают электродвигатель, приводя тем самым систему в колебательное движение. В моменты взвешивания цилиндра воздух направляют через обводной канал 21. В протоколе № 2 записывают время (от начала испытания) и убыль массы  $\Delta G$ .

Одновременно с регистрацией убыли массы образца в течение всего испытания измеряют по сухому и мокрому термометрам (показания психрометров) температуру воздуха до калорифера  $t_c$  и  $t'_a$ , перед сушильной камерой  $t_{c1}$ ,  $t'_{a1}$  и после сушильной камеры  $t_{c2}$ ,  $t'_{a2}$ .

Во время испытания измеряют скорость движения воздуха в рабочей камере. Испытание продолжают до тех пор, пока практически не прекратится убыль массы образца материала. Все данные испытания (замеры) записывают в протокол № 2, к которому прикладывают диаграммы, снятые с самопишущих приборов.

По окончании испытания образец вынимают из сушилки, берут пробу для определения конечной влажности, выключают калорифер, вентилятор и систему контроля и регулирования.

## Обработка результатов испытания

**Определение начальной влажности материала.** Этот параметр определяют для навесок в каждом бьюксе  $W'_0$  и  $W''_0$  по данным протокола № 1 и по формуле (в %):

$$W_0 = \frac{g_{вл}}{g_1} \cdot 100,$$

где  $g_{вл}$  — масса влаги в навеске, г;  $g_1$  — масса навески после сушки до постоянной массы, г.

По найденной для каждой навески влажности  $W_{01}$  и  $W_{02}$  определяют среднюю начальную влажность  $W_{0cp}$  материала (в %)

$$W_{0cp} = \frac{W_{01} + W_{02}}{2}.$$

**Определение сухой массы образца.** Этот параметр (в г) вычисляют по формуле

$$G_c = \frac{G_1}{1 + W_{0\text{ср}}^c / 100}, \quad (2.108)$$

где  $G_1$  — начальная масса влажного материала, г.

**Определение влажности материала в процессе сушки.** Влажность (в %) определяют для каждого  $n$ -го замера по формуле

$$W_n^* = \frac{G_{\text{вкл}}}{G_c} \cdot 100.$$

Для этого, используя данные расчета и протокола № 2, для каждого момента времени (для каждого замера) предварительно определяют:

$$\text{массу образца } G_n = G_{n-1} - \Delta G_1,$$

где  $G_n$  — масса образца в данный момент, г;  $G_{n-1}$  — масса образца в момент предыдущего замера, г;  $\Delta G_1$  — убыль массы между замерами, г;

массу влаги в образце

$$G_{\text{вл}n} = G_n - G_c.$$

**Построение кривой сушки.** Кривую сушки, дающую графическую зависимость между влажностью материала и временем, строят на миллиметровой бумаге по данным протокола № 2 (рис. 2.26).

По оси абсцисс откладывают в определенном масштабе время от начала испытания  $\tau$  (в ч), а по оси ординат — влажность материала  $W^*$  (в %).

Экспериментальные точки соединяют плавной линией, которая и будет кривой сушки. На кривой сушки находится критическая точка, которая делит весь процесс на периоды постоянной и падающей скорости сушки.

**Построение кривой скорости сушки.** Ее строят методом графического дифференцирования кривой сушки. На кривой сушки намечают несколько точек (от 10 до 15), для которых будет определена скорость сушки. Через каждую точку проводят касательную к кривой и определяют тангенс угла наклона каждой касательной. Например, для точки 5  $\text{tg} \psi_5 = a/b$  (где  $a$  — величина отрезка на оси ординат;  $b$  — величина отрезка вдоль оси абсцисс).

Найденные таким образом тангенсы углов наклона касательных во всех точках имеют размерность %/ч и показывают изменение влажности материала за единицу времени

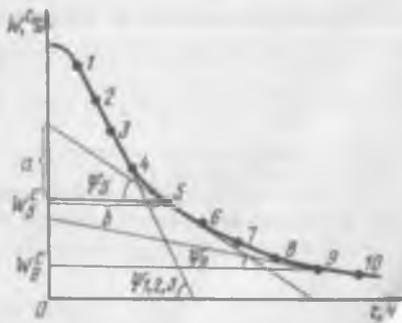


Рис. 2.26. Кривая сушки и схема графического дифференцирования

( $dW/d\tau$ ), т. е. соответствуют скорости сушки в этих точках при определенной влажности (для точки 5 при влажности  $W_5^*$ , для точки 9 — при влажности  $W_9^*$  и т. д.).

Для точек 1, 2, 3, лежащих на прямой, тангенсы угла наклона одинаковы. Это свидетельствует о том, что точки лежат в периоде постоянной скорости сушки. Для последующих точек тангенсы уменьшаются, следовательно, процесс сушки происходит с убывающей скоростью. Значения скорости сушки, найденные как тангенсы угла наклона касательных, записывают в протокол испытания № 3.

### Протокол № 3

Параметр	Номер точки на рис. 2.26									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Влажность в точках  $W^*$ , %  
Скорость сушки  $dW/d\tau$ , %/ч

По данным протокола № 3 на миллиметровой бумаге строят кривую скорости сушки  $dW/d\tau = f(W^*)$ . По оси ординат откладывают скорость сушки (в %/ч), а по оси абсцисс — влажность материала (в %). На этом графике также отмечают критическую точку, соответствующую ей критическую влажность  $W_{к1}^*$  и два периода сушки.

**Определение режима сушки.** По показаниям психрометров, средним значениям  $t_c$  и данным протокола № 2 определяют психрометрическую разность для воздуха перед калорифером, перед рабочей камерой и после нее по формуле

$$e = t_c - t'_н.$$

По найденным значениям  $e$  и приложению 4 определяют относительную влажность воздуха перед калорифером  $\phi_0$ , перед рабочей камерой  $\phi_1$  и после рабочей камеры  $\phi_2$ .

#### Вопросы для самопроверки

1. Дайте характеристику конвективной сушки.
2. Как строится кривая сушки?
3. Как строится кривая скорости сушки?
4. В чем заключается метод графического дифференцирования?
5. Дайте анализ кривых сушки и скорости сушки.

**Работа № 8. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
[ВЛАГОКОЭФФИЦИЕНТОВ] МЕТОДОМ СНЯТИЯ КРИВОЙ СУШКИ**

**Физическая модель процесса.** Образец влажного материала в форме неограниченной пластины (толщина пластины значительно меньше длины и ширины ее) подвергают конвективной сушке нагретым воздухом (параметры его заданы). Процесс сушки протекает во второй период убывающей скорости, когда начальная влажность материала меньше критической точки. В этот период удаляются влага микрокапилляров и адсорбционная связанная влага и коэффициент диффузии влаги  $a_m$  невелик. Поэтому процесс лимитируется малой интенсивностью внутреннего переноса влаги, поверхность испарения интенсивно углубляется внутрь материала, а образующийся на его поверхности сухой слой имеет значительное гигротермическое сопротивление. Движущей силой внутреннего переноса влаги является градиент влагосодержания, значение которого в процессе сушки уменьшается, что характерно для сушки как типичного необратимого процесса.

Плотность внутреннего потока влаги может быть определена по закону диффузии (первый закон Фика), а плотность потока влаги с поверхности материала в окружающую среду обусловлена коэффициентом внешнего влагообмена  $\alpha_m$  и соответствующей разностью парциальных давлений пара  $p_u - p_n$  (где  $p_u$ ,  $p_n$  — парциальное давление соответственно на поверхности материала и в окружающей среде) или разностью  $u - u_p$  (где  $u$ ,  $u_p$  — соответственно текущее и равновесное влагосодержание).

**Математическое описание процесса.** Нахождение уравнения кривой сушки  $W^c = f(\tau)$  во второй период связано с решением дифференциального уравнения влагопроводности, которое для одномерной задачи имеет вид:

$$\frac{du}{d\tau} = a_m (\partial^2 u / \partial x^2), \quad (2.109)$$

где  $u$  — удельное влагосодержание материала в точке образца с координатой  $x$ , кг/кг сухого материала;  $a_m$  — коэффициент диффузии (внутреннего переноса влаги),  $m^2/ч$ .

В начальный момент периода падающей скорости влажность материала равна критической влажности ( $W_{к1}^c$ ).

Для тонких материалов можно допустить, что влажность равномерно распределена по сечению материала, и тогда при  $\tau = 0$

$$u = u_{к1} = \text{const}, \quad (2.110)$$

где  $u_{к1}$  — критическое влагосодержание.

Граничное условие таково:

$$a_m \rho_0 (du/dx)_{\text{пов}} + \alpha_{mu} \rho_0 (u_n - u_p) = 0^* \quad (2.111)$$

т. е. плотность потока влаги к поверхности материала равняется плотности потока влаги с поверхности в окружающую среду (уравнение баланса влаги).

В формуле (2.111)  $\alpha_{mu}$  — коэффициент внешнего влагообмена (иногда его обозначают буквой  $\beta$ ), м/ч;  $u_n$  — влагосодержание на поверхности;  $u_p$  — равновесное влагосодержание, кг/кг сухого материала;  $\rho_0$  — плотность сухого вещества материала, кг сухого материала на 1 м<sup>3</sup>.

Так как в состоянии равновесия влажность одинакова во всех точках образца материала, то средняя равновесная влажность (в %)

$$W_p^* = 100u_p.$$

Задача состоит в определении коэффициентов внутренней диффузии влаги ( $a_m$ ) и внешнего влагообмена ( $\alpha_{mu}$ ) с помощью кривой сушки. Для этого надо решить дифференциальное уравнение (2.109) при начальном (2.110) и граничном (2.111) условиях и из полученного решения найти среднюю влажность материала.

**Решение задачи.** Решение дифференциального уравнения (2.109) для образца в форме неограниченной пластины имеет вид

$$E = \frac{u - u_p}{u_n - u_p} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n L_n e^{-\mu_n^2 Fo_m}, \quad (2.112)$$

где  $E$  — влагосодержание (в данном случае безразмерная величина);  $A_n$  — постоянные числа, зависящие от геометрической формы тела и условий влагообмена, характеризуемых величиной  $\alpha_{mu}$  входящего в выражение массообменного критерия Био.

$$Bi_m = \frac{\alpha_{mu}}{a_m} R,$$

здесь  $R$  — определяющий геометрический размер — половина толщины пластины.

Числа  $A_n$  определяют по следующей формуле:

$$A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n},$$

где  $\mu_n$  — постоянные числа, определяемые из характеристического уравнения

$$\operatorname{ctg} \mu_n = \mu_n / Bi_m;$$

\* Данное уравнение является приближенным, так как коэффициент массообмена  $\alpha_{mu}$  зависит от влажности и является переменной величиной;  $a_m$  также зависит от температуры и влажности, поэтому более точно расчет вести по зонам, считая влажностные коэффициенты в пределах зоны постоянными.

$L_n$  — функции, учитывающие распределение влажности внутри тела:

$$L_n = \cos \mu_n (x/R),$$

где  $x$  — координата точки.

Массообменный критерий Фурье  $Fo_m$  (критерий гомохронности или безразмерное время) находят по формуле

$$Fo_m = a_m \tau / R^2,$$

где  $a_m$  — коэффициент внутренней диффузии влаги.

Таким образом, в общем виде

$$E = \Phi (Bi_m; x/R; Fo_m),$$

что аналогично известному решению задач теплопроводности.

Ряд (2.112) быстро сходится, поэтому, если исключить из рассмотрения малые значения числа Фурье, т. е.  $Fo_m > 0,1$ , то можно ограничиться первым членом ряда.

Для перехода от влагосодержания в точке  $u$  к средней влажности пластины  $W^*$  надо воспользоваться известным соотношением для определения среднего значения

$$W^*/100 = 1/R \int_0^R u dx.$$

Тогда после преобразования получим

$$\frac{W^c - W_p^c}{W_k^c - W_p^c} = \frac{2Bi_m^2}{(\mu_1^2 + Bi_m^2 + Bi_m^2 \mu_1^2)} e^{-\mu_1^2 Fo_m}. \quad (2.113)$$

Обозначим коэффициент перед экспонентой через  $B^*$ , тогда

$$W^c - W_p^c = (W_k - W_p) B e^{-\mu_1^2 \frac{a_m \tau}{R^2}}. \quad (2.114)$$

Соотношение (2.114) и есть уравнение кривой сушки в период падающей скорости. Прологарифмируем это уравнение:

$$\ln (W^c - W_p^c) = \ln (W_k - W_p) B - \mu_1^2 \frac{a_m \tau}{R^2}, \quad (2.115)$$

т. е. зависимость между  $\ln (W^c - W_p^c)$  и временем  $\tau$  графически представляется в виде прямой линии.

Как указывалось, величина  $\mu_1$  определяется из характеристического уравнения

$$\operatorname{ctg} \mu_1 = \frac{1}{Bi_m} \mu_1 \quad (2.116)$$

или приближенно

$$\mu_1^2 \cong \frac{1}{1/Bi_m + 4/\pi^2}. \quad (2.117)$$

\* Величина  $B$  для малых значений  $Bi_m$  близка к 1.

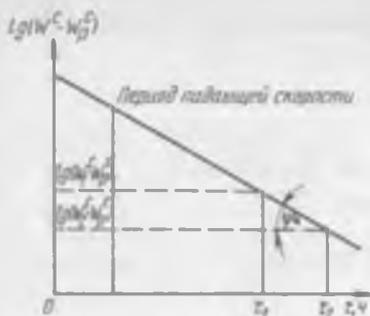


Рис. 2.27. График кривой сушки в виде зависимости (2.118) для периода падающей скорости сушки

мы построим график зависимости величины  $\lg(W^c - W_p)$  от времени  $\tau$ , то получим прямую для периода падающей скорости (рис. 2.27). Тангенс угла наклона этой прямой согласно уравнению (2.118)

$$\operatorname{tg} \Psi = \frac{a_m}{R^2} \cdot \frac{1}{2,3} \cdot \frac{1}{4/\pi^2 + 1/\operatorname{Bi}_m}. \quad (2.119)$$

Величину  $\operatorname{tg} \Psi$  определяют из графика на рис. 2.27, т. е.

$$\operatorname{tg} \Psi = \frac{\lg(W_1^c - W_p) - \lg(W_2^c - W_p)}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (2.120)$$

Зная величину  $\operatorname{tg} \Psi$ , по формуле (2.119) можно определить коэффициент  $a_m$ , если известен коэффициент влагообмена  $\alpha_{mu}$ ; формулу (2.119) можно переписать так:

$$a_m = \frac{4R^2}{\pi^2} \cdot \frac{1}{1/2,3 \operatorname{tg} \Psi - R/\alpha_{mu}}, \quad (2.121)$$

подставив в нее вместо числа Био его значение  $\frac{\alpha_{mu}}{a_m} R$ .

Коэффициент влагообмена

$$\alpha_{mu} = \frac{N_1 R \rho_{n\phi}}{100(\rho_n - \rho_n) W_p^c}. \quad (2.122)$$

где  $N_1 = (W_\delta - W_{\delta 1})/\tau_{\delta 1}$ ,

$$(2.122a)$$

здесь  $W_\delta$  — начальная влажность;  $W_{\delta 1}$  — влажность в конце первого периода;  $\tau_{\delta 1}$  — продолжительность первого периода.

Давления  $\rho_n$ ,  $\rho_n$  определяем из приложения 1, разность  $\rho_n - \rho_n$  — по формуле Шпрунга:

$$\rho_n - \rho_n = 0,504(B \times 10^5)(t_c - t_n),$$

Подставив это выражение вместо  $\rho_n$  в уравнение (2.115) и заменив натуральный логарифм десятичным, получим

$$\lg(W^c - W_p) = \lg(W_\delta^c - W_p) B - \frac{a_m \tau}{R^2} \frac{1}{2,3(1/\operatorname{Bi}_m + 4/\pi^2)}. \quad (2.118)$$

Уравнение (2.118) представляет собой уравнение линейной зависимости между двумя переменными величинами:  $\lg(W^c - W_p)$  и  $\tau$ . Следовательно, если

где  $B$  — барометрическое давление, Па;  $t_c$  — температура сухого термометра;  $t_w$  — истинная температура мокрого термометра, которая определяется по показанию мокрого термометра ( $t'_w$ ) с поправкой  $\Delta$ :

$$t_w = t'_w - \frac{\Delta(t_w - t'_w)}{100}$$

Равновесную влажность находим из кривой сушки, скорость сушки в первый период  $N_1$  — по формуле (2.122а), относительную влажность — по отношению  $p_n/p_n$  или по таблицам (зная  $t_c$  и  $t_w$ ).

Вычислив коэффициент влагообмена  $\alpha_{mн}$  и величину  $\text{tg}\xi$  из графика, находим коэффициент диффузии влаги  $a_m$  по формуле (2.121).

Значения коэффициентов диффузии влаги и влагообмена относятся к определенному режиму сушки, характеризуемому температурой  $t_c$ , относительной влажностью  $\phi$  и скоростью движения  $u$  воздуха.

## Цель работы

1. Изучение теории и метода определения массообменных коэффициентов — внутренней диффузии (переноса) влаги и внешне-го влагообмена.

2. Проведение экспериментов по снятию кривой сушки для расчета значений массообменных коэффициентов.

## Описание экспериментальной установки

Опыты проводят на любой лабораторной сушильной установке, оснащенной необходимой контрольно-измерительной аппаратурой. В качестве экспериментальной установки может быть использована конвективная сушильная установка (см. работу № 7) или сушильный шкаф. Установка должна быть оснащена весами и аппаратурой для контроля и стабилизации режима сушки (температуры, влажности и скорости воздуха).

## Методика проведения испытания

Образец материала берут в форме пластины, толщина которой должна быть меньше ее ширины и длины (удобно использовать, например, хлебный сухарь, картон). Образец материала при помощи стержня прикрепляют к рычагу технических весов, находящийся сверху термостата. В процессе сушки материала фиксируют время удаления определенного количества влаги (например, 1 г, 0,5 г и т. д.).

Взвешивание проводят таким образом. После помещения образца материала в рамку, прикрепленную к коромыслу весов,

быстро уравнивают весы с небольшим недостатком, т. е. так, чтобы масса образца немного превышала массу гирь\*. По часам отмечают начало опыта, в этот момент времени масса образца точно равна массе гирь на левой чаше весов. Затем на правую чашу весов (с образцом) помещают перегрузки сначала по 1 г, далее по 0,5; 0,3; 0,2; 0,1 г и каждый раз отмечают время прохождения стрелкой весов нулевого деления. Оно соответствует времени удаления с поверхности образца 1; 0,5; 0,3 г влаги и т. д.

Опыт продолжают до тех пор, пока время удаления 0,1 г влаги с поверхности образца не будет равняться примерно 15—20 мин. После этого опыт прекращают. Температуру сухого и мокрого термометров измеряют каждые 10 мин. Все замеры, проведенные в опыте, заносят в протокол.

В начале протокола записывают дату опыта, ниже — краткую характеристику образца и сухую массу материала, которую сообщает студенту преподаватель.

Протокол испытания

Время начала и конца опыта	Время замера	Масса образца $G$ , г	Убыль массы, г	Масса влаги $G_{вл}$ , г	Влажность материала $W$ , %	Температура термометра, °C	
						$t_c$	$t_n$

Массу влаги в начальный момент времени и в каждый последующий определяют путем вычитания из начальной и каждой последующей массы образца сухой массы его:

$$G_{вл} = G - G_c.$$

Влажность материала (в %)

$$W^x = (G_{вл}/G_c) \cdot 100.$$

### Обработка результатов испытания

На основании данных протокола испытания на миллиметровой бумаге строят кривую сушки: по оси ординат откладывают влажность  $W_c$ , а по оси абсцисс — время  $\tau$ . Затем строят график в координатах  $\lg(W^x - W_p^x) - \tau$  (см. рис. 2.27). Расчетом по приведенным выше формулам определяют коэффициент внешнего влагообмена  $\alpha_{тв}$  и рассчитывают коэффициент внутренней диффузии влаги.

\* Целесообразно применение автоматических весов с непрерывной записью показаний.

## Вопросы для самопроверки

1. Дайте характеристику двух периодов процесса сушки: постоянной и убывающей скорости сушки
2. Дайте анализ дифференциального уравнения влагопроводности и его крайних условий.
3. Каков физический смысл коэффициента внешнего влагообмена и внутренней диффузии (переноса) влаги?
4. В чем заключается метод графической обработки кривой сушки для периода падающей скорости?
5. Объясните сущность метода расчета массообменных коэффициентов.

## Список рекомендуемой литературы

- Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1973.—527 с.
- Гинзбург А. С., Савина И. М. Массовлагодобменные характеристики пищевых продуктов. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. — 280 с.
- Лыков А. В. Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 560 с.
- Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.

## Работа № 9. ИСПЫТАНИЕ БАРАБАННОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Сушильная установка для конвективной сушки материалов состоит из трех основных элементов: сушильной камеры, в которой происходит процесс сушки (конструкция камеры зависит в основном от свойств материала, подвергающегося сушке, и производительности); калорифера, в котором перед подачей в сушильную камеру воздух нагревается паром или топочными газами; вентилятора для циркуляции воздуха в установке.

Расход пара на нагревание воздуха в калорифере определяется количеством теплоты, которое требуется для нагревания воздуха. Производительность вентилятора и мощность его электродвигателя определяются количеством воздуха, которое необходимо для испарения влаги из материала в процессе сушки.

Таким образом, основными технико-экономическими показателями работы сушильной установки являются удельные расходы воздуха и теплоты в калорифере, а также тепловой КПД.

Полный расход воздуха, необходимый для испарения влаги из материала (в кг/ч или кг/с):

$$L = U \frac{1000}{d_2 - d_0}, \quad (2.123)$$

где  $U$  — количество влаги, удаленной из материала в процессе сушки, кг/ч или кг/с;  $d_0$  — удельное влагосодержание воздуха, поступающего в сушильную камеру, г/кг сухого воздуха;  $d_2$  — удельное влагосодержание воздуха, уходящего из сушильной камеры (отработанного), г/кг сухого воздуха.

быстро уравнивают весы с небольшим недостатком, т. е. так, чтобы масса образца немного превышала массу гирь\*. По часам отмечают начало опыта, в этот момент времени масса образца точно равна массе гирь на левой чаше весов. Затем на правую чашу весов (с образцом) помещают перегрузки сначала по 1 г, далее по 0,5; 0,3; 0,2; 0,1 г и каждый раз отмечают время прохождения стрелкой весов нулевого деления. Оно соответствует времени удаления с поверхности образца 1; 0,5; 0,3 г влаги и т. д.

Опыт продолжают до тех пор, пока время удаления 0,1 г влаги с поверхности образца не будет равняться примерно 15—20 мин. После этого опыт прекращают. Температуру сухого и мокрого термометров измеряют каждые 10 мин. Все замеры, проведенные в опыте, заносят в протокол.

В начале протокола записывают дату опыта, ниже — краткую характеристику образца и сухую массу материала, которую сообщает студенту преподаватель.

#### Протокол испытания

Время начала и конца опыта	Время замера	Масса образца $G$ , г	Убыль массы, г	Масса влаги $G_{вл}$ , г	Влажность материала $W^c$ , %	Температура термометра, °C	
						$t_c$	$t_m$

Массу влаги в начальный момент времени и в каждый последующий определяют путем вычитания из начальной и каждой последующей массы образца сухой массы его:

$$G_{вл} = G - G_c.$$

Влажность материала (в %)

$$W^c = (G_{вл}/G_c) \cdot 100.$$

#### Обработка результатов испытания

На основании данных протокола испытания на миллиметровой бумаге строят кривую сушки: по оси ординат откладывают влажность  $W^c$ , а по оси абсцисс — время  $\tau$ . Затем строят график в координатах  $\lg(W^c - W_p^c) - \tau$  (см. рис. 2.27). Расчетом по приведенным выше формулам определяют коэффициент внешнего влагообмена  $\alpha_{тн}$  и рассчитывают коэффициент внутренней диффузии влаги.

\* Целесообразно применение автоматических весов с непрерывной записью показаний.

## Вопросы для самопроверки

1. Дайте характеристику двух периодов процесса сушки: постоянной и убывающей скорости сушки.
2. Дайте анализ дифференциального уравнения влагопроводности и его крайних условий.
3. Каков физический смысл коэффициента внешнего влагообмена и внутренней диффузии (переноса) влаги?
4. В чем заключается метод графической обработки кривой сушки для периода падающей скорости?
5. Объясните сущность метода расчета массообменных коэффициентов.

## Список рекомендуемой литературы

- Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1973.—527 с.
- Гинзбург А. С., Савина И. М. Массовлагодобменные характеристики пищевых продуктов. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. — 280 с.
- Лыков А. В. Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 560 с.
- Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.

## Работа № 9. ИСПЫТАНИЕ БАРАБАННОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Сушильная установка для конвективной сушки материалов состоит из трех основных элементов: сушильной камеры, в которой происходит процесс сушки (конструкция камеры зависит в основном от свойств материала, подвергающегося сушке, и производительности); калорифера, в котором перед подачей в сушильную камеру воздух нагревается паром или топочными газами; вентилятора для циркуляции воздуха в установке.

Расход пара на нагревание воздуха в калорифере определяется количеством теплоты, которое требуется для нагревания воздуха. Производительность вентилятора и мощность его электродвигателя определяются количеством воздуха, которое необходимо для испарения влаги из материала в процессе сушки.

Таким образом, основными технико-экономическими показателями работы сушильной установки являются удельные расходы воздуха и теплоты в калорифере, а также тепловой КПД.

Полный расход воздуха, необходимый для испарения влаги из материала (в кг/ч или кг/с):

$$L = U \frac{1000}{d_2 - d_0}, \quad (2.123)$$

где  $U$  — количество влаги, удаленной из материала в процессе сушки, кг/ч или кг/с;  $d_0$  — удельное влагосодержание воздуха, поступающего в сушильную камеру, г/кг сухого воздуха;  $d_2$  — удельное влагосодержание воздуха, уходящего из сушильной камеры (отработанного), г/кг сухого воздуха.

Полный расход теплоты в калорифере на нагревание воздуха

$$Q_{\text{квл}} = L(i_1 - i_0), \quad (2.124)$$

где  $L$  — полный расход воздуха, кг/ч или кг/с;  $i_1$  — удельная энтальпия воздуха после калорифера, Дж/кг сухого воздуха;  $i_0$  — удельная энтальпия воздуха до калорифера, Дж/кг сухого воздуха.

Для сравнительной оценки работы сушильных установок определяют удельные расходы воздуха и теплоты в калорифере. Удельный расход воздуха характеризует количество воздуха, отнесенное к 1 кг испаренной влаги:

$$l = L/U, \text{ или } l = \frac{1000}{d_2 - d_0}. \quad (2.125)$$

Удельный расход воздуха снижается с уменьшением удельного влагосодержания воздуха, поступающего в калорифер, и с увеличением удельного влагосодержания воздуха, уходящего из сушильной камеры.

Удельный расход теплоты в калорифере характеризует количество теплоты, затраченной на нагревание воздуха в калорифере, отнесенное к 1 кг испаренной влаги:

$$q_{\text{квл}} = Q_{\text{квл}}/U, \text{ или } q_{\text{квл}} = l(i_1 - i_0). \quad (2.126)$$

Тепловой КПД сушильной установки  $\eta$  характеризует отношение количества теплоты  $q$ , пошедшей на испарение 1 кг влаги из материала, к теплоте  $q_{\text{квл}}$ , затраченной на нагревание воздуха в калорифере в расчете на 1 кг испаренной влаги.

Удельные расходы воздуха и теплоты в калорифере можно также определить по  $i-d$ -диаграмме влажного воздуха Л. К. Рамзина. По ней можно определить все параметры влажного воздуха, а также построить процесс сушки и сделать его графический расчет.

Основные принципы построения диаграммы заключаются в следующем. Все параметры воздуха на диаграмме соответствуют среднегодовому барометрическому давлению  $p_0 = 99,3$  кПа. Диаграмма построена в косоугольной системе координат: угол между осями составляет  $135^\circ$ . На оси абсцисс, а также на вспомогательной горизонтальной оси в определенных масштабах откладывают удельное влагосодержание воздуха  $d$  (в г/кг сухого воздуха), на оси ординат — удельную энтальпию воздуха  $i$  (в Дж/кг сухого воздуха).

Вертикальные линии на диаграмме являются линиями постоянного удельного влагосодержания ( $d = \text{const}$ ). Линии, расположенные под углом  $135^\circ$  к оси ординат, являются линиями постоянной удельной энтальпии ( $i = \text{const}$ ). Линии постоянной температуры — изотермы ( $t = \text{const}$ ) — имеют вид почти параллельных

прямых, расположенных под небольшим углом к горизонтальной оси удельного влагосодержания. Линии постоянной относительной влажности ( $\varphi = \text{const}$ ) имеют вид пучка кривых, расходящихся вверх вправо.

Линия  $\varphi = 100\%$  делит диаграмму на две части. Выше этой линии лежит область, характерная для смеси сухого воздуха и водяного пара. Чем выше на диаграмме расположена линия  $\varphi = \text{const}$ , чем дальше она от линии  $\varphi = 100\%$ , тем суше воздух. Ниже линии  $\varphi = 100\%$  лежат области, в которых насыщенный водяной пар частично конденсируется в виде капель. Линия парциального давления водяного пара проходит через нижнюю часть диаграммы. Линии постоянной температуры мокрого термометра ( $t_m = \text{const}$ ) нанесены на диаграмму пунктиром.

Состояние влажного воздуха определяется на диаграмме положением точки пересечения линий любых двух известных параметров. Если известны температура воздуха  $t_1$  и его относительная влажность  $\varphi_1$ , то на диаграмме (рис. 2.28) выбирают соответствующие линии  $t_1 = \text{const}$  и  $\varphi_1 = \text{const}$ . Пересечение этих линий даст точку  $A$ , которая характеризует состояние заданного воздуха. Спускаясь из этой точки вниз вдоль линии  $d = \text{const}$ , на горизонтальной оси определяют удельное влагосодержание воздуха  $d_1$ . По линии  $i = \text{const}$ , проходящей через точку  $A$ , на вертикальной оси определяют удельную энтальпию воздуха  $i_1$ .

Чтобы найти величину парциального давления водяного пара [ $p_n = \varphi(d)$ ], надо из точки  $A$  спуститься по линии  $d_1 = \text{const}$  до линии парциального давления водяного пара (точка  $a$ ) и перейти по горизонтали на правую вертикальную ось, где в масштабе отложено давление; парциальное давление будет  $p_{n1}$ .

Для определения значения давления насыщенного пара в воздухе при известной температуре  $t_1$  следует найти точку пересечения изотермы  $t_1 = \text{const}$  и линии  $\varphi = 100\%$  (точка  $b$ ). Этой точке соответствует максимальное удельное влагосодержание воздуха  $d_{\text{max}}$  при температуре  $t_1$ . Оно определяет величину максимального давления водяного пара при полном насыщении воздуха, т. е. давление насыщенного пара  $p_{\text{нас}1}$ .

Для определения значения  $p_{\text{нас}1}$  из точки  $b$  следует спуститься по линии  $d_{\text{max}}$  до линии парциального давления водяного пара (точка  $v$ ) и перейти по горизонтали на ось давлений, где в масштабе можно определить величину  $p_{\text{нас}1}$ .

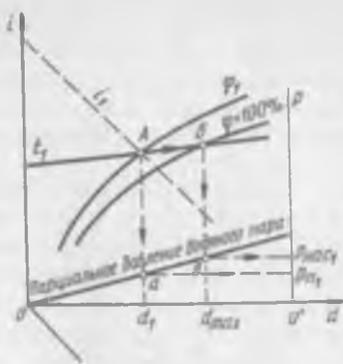


Рис. 2.28. Графическое определение параметров влажного воздуха



Рис. 2.29. Изображение на  $i-d$ -диаграмме основных процессов изменения состояния влажного воздуха:  $a$  — нагревания и охлаждения;  $b$  — осушки;  $c$  — испарения влаги из материала;  $z$  — смешивания воздуха разных параметров

Под действием разных условий в воздухе происходят разнообразные процессы: нагревание, охлаждение, увлажнение, осушка, смешивание с воздухом других параметров и т. д., в результате которых состояние воздуха изменяется, что сопровождается изменением его параметров.

При **нагревании** влажного воздуха количество содержащейся в нем влаги не изменяется, т. е. процесс происходит при  $d = \text{const}$ . На диаграмме (рис. 2.29,  $a$ ) этот процесс изображен вертикальной линией  $d_0 = \text{const}$  вверх от точки  $A$  до конечной температуры нагреваемого воздуха  $t_1$  (точка  $B$ ) — линией  $AB$ . Нагревание воздуха от температуры  $t_0$  до  $t_1$  сопровождается повышением его удельной энтальпии от  $i_0$  до  $i_1$  и уменьшением относительной влажности от  $\varphi_0$  до  $\varphi_1$ .

**Охлаждение** влажного воздуха, как и нагревание, происходит при постоянном удельном влагосодержании. На диаграмме (рис. 2.29,  $a$ ) процесс охлаждения воздуха, состояние которого характеризуется точкой  $B'$ , изображается линией  $B'A'$ , вниз вдоль линии  $d' = \text{const}$ . При этом удельная энтальпия воздуха уменьшается от  $i'_1$  до  $i'_0$ , а относительная влажность увеличивается от  $\varphi'_1$  до  $\varphi'_0$ .

Если охлаждать воздух температурой  $t_1$  и относительной влажностью  $\varphi_1$  (точка  $A$  на рис. 2.29,  $b$ ) процесс будет протекать по линии  $d_1 = \text{const}$  до точки  $B$  на линии  $\varphi = 100\%$ . Температура воздуха  $t_2$ , соответствующая полному насыщению его водяным паром, есть температура точки росы  $t_p$ . Охлаждение воздуха ниже температуры  $t_2 = t_p$  сопровождается конденсацией из него пара, т. е. осушкой. Осушка воздуха изображается на диаграмме

линией  $BC$  вдоль линии  $\varphi = 100\%$  от изотермы  $t_2$  до изотермы  $t_3$ , соответствующей конечной температуре охлаждаемого воздуха.

Процесс осушки воздуха характеризуется уменьшением его удельного влагосодержания от  $d_1$  до  $d_2$ . Если воздух в состоянии  $C$  вновь нагреть до начальной температуры  $t_1$ , то получится воздух состояния  $D$ , более сухой ( $\varphi' < \varphi_1$ ).

Если в воздух состояния  $B$  поместить влажный материал, то будет происходить испарение влаги из материала в воздух. При этом (с учетом потерь теплоты) удельная энтальпия воздуха и температура его будут понижаться, а удельное влагосодержание и относительная влажность — увеличиваться.

Такой процесс, происходящий в сушильных камерах, изображается на диаграмме линией  $BC$  (рис. 2.29,  $\theta$ ).

Смешивание воздуха состояния  $A$  с параметрами  $t_0, \varphi_0, d_0, i_0$  и воздуха состояния  $C$  с параметрами  $t_2, \varphi_2, d_2, i_2$  в соотношении  $1:n$  дает смесь с параметрами  $t_{см}, \varphi_{см}, d_{см}, i_{см}$ . Зависимости между параметрами смеси и параметрами ее составляющих следующие:

$$\left. \begin{aligned} d_0 + nd_2 &= (1+n)d_{см}; \\ i_0 + ni_2 &= (1+n)i_{см}. \end{aligned} \right\} \quad (2.127)$$

Графически эти зависимости изображаются прямой линией. На рис. 2.29,  $z$  процесс смешивания изображается прямой линией, проходящей через точки  $A$  и  $C$ . Точка  $M$ , характеризующая состояние смеси, делит прямую  $AC$  на отрезки соответственно пропорции смеси:

$$AM/MC = n/1 \text{ или } AC/MC = n + 1.$$

Параметры смеси (точка  $M$ ) определяют по формулам

$$\left. \begin{aligned} d_{см} &= \frac{d_0 + nd_2}{1+n}; \\ i_{см} &= \frac{i_0 + ni_2}{1+n}. \end{aligned} \right\} \quad (2.128)$$

Процесс смешивания воздуха разных параметров имеет место в процессе сушки с частичным возвратом отработанного воздуха (с рециркуляцией).

### Цель работы

1. Построение по данным испытания процесса сушки в  $i-d$ -диаграмме.
2. Аналитический расчет:
  - удельного и полного расхода воздуха;
  - удельного и полного расхода теплоты в калорифере.

3. Графический расчет по  $i - d$ -диаграмме: удельного расхода воздуха; удельного расхода теплоты в калорифере.
4. Расчет КПД сушильной установки.

#### Описание экспериментальной установки

Работа проводится на установке (см. рис. 2.23), состоящей из сушильного барабана, вращающегося с определенной частотой (барабанные сушилки применяются для сушки сыпучих материалов); парового пластинчатого калорифера, в котором происходит подогревание сушильного агента (воздуха); вентилятора и системы воздухопроводов с заслонками-шиберами. Материал и воздух движутся в барабане в одном направлении, т. е. сушилка работает по принципу прямотока.

Влажный материал, подвергающийся сушке, поступает внутрь сушильного барабана. На внутренней поверхности барабана по винтовой линии расположены лопасти, с помощью которых материал внутри барабана пересыпается и перемещается вдоль его в потоке горячего воздуха. Высушенный материал собирается в бункере и ссыпается через периодически открывающееся разгрузочное отверстие в приемник.

Свежий воздух засасывается вентилятором из помещения и поступает на подогревание в калорифер. На воздуховоде между вентилятором и калорифером установлен психрометр, по показаниям которого ( $t_{c0}$  и  $t'_{c0}$ ) можно определить все параметры свежего воздуха.

В калорифере воздух нагревается паром. Подогретый до определенной температуры воздух поступает из калорифера по воздуховоду внутрь сушильного барабана. Параметры подогретого воздуха определяют по показанию сухого термометра ( $t_{c1}$ ). Количество воздуха, поступающего в барабан, в зависимости от параметров воздуха, количества и влажности материала регулируют шибером. Из сушильного барабана выходит отработанный воздух, охлажденный и увлажненный, параметры которого можно определить по показаниям психрометра на выходе из барабана ( $t_{c2}$  и  $t'_{c2}$ ).

На установке можно проводить сушку только свежим воздухом (нормальный сушильный процесс) и сушку с частичным возвратом отработанного воздуха (сушка с рециркуляцией). При сушке свежим воздухом шибер 8 должен быть закрыт, а весь отработанный воздух выбрасывается через шибер 10. При сушке с возвратом отработанного воздуха часть его выбрасывается через шибер 10, а часть через шибер 8 направляется к вентилятору, где смешивается со свежим воздухом, поступающим через шибер 3. Смесь воздуха направляется на подогревание в калорифер.

Соотношение количества отработанного и свежего воздуха в смеси (кратность смешивания) регулируется шиберами 3, 8, 10.

Выбор варианта сушки определяется свойствами материала, подвергающегося сушке.

#### Методика проведения испытания

Объектом сушки является сыпучий материал (сахар-песок, зерно и др.). Перед началом испытания подготавливают материал: увлажняют путем разбрызгивания распылителем воды. Увлажненный материал выдерживают в течение 10—20 мин для равномерного распределения в нем влаги. Из влажного материала отбирают пробы (по 5 г) в два бюкса (массу бюксов определяют заранее) для определения начальной влажности материала. Бюксы с пробой взвешивают на аналитических весах и ставят в сушильный шкаф, температуру в котором при помощи терморегулятора поддерживают постоянной — равной 105—130°C. Периодически (через каждые 20—30 мин) бюксы вынимают из сушильного шкафа и после охлаждения в эксикаторе взвешивают.

Пробы в бюксах высушивают в сушильном шкафу до постоянной массы, т. е. до тех пор, пока два очередных взвешивания не дадут одинакового результата. Результаты взвешиваний записывают в протокол испытания № 1.

При подготовке установки к испытанию выбирают вариант сушки — нормальный сушильный процесс, т. е. сушка только свежим воздухом. В соответствии с этим открывают шибера 3, 10, 14 на воздуховодах; шибер 8 должен быть закрыт. Включают вентилятор и открывают кран 2 для отвода конденсата в мерник. В калорифер подают пар. С помощью вентиля 11 устанавливают избыточное давление пара по манометру около 130 кПа (1,3 кгс/см<sup>2</sup>), продувают конденсатоотводчик.

С этого момента наблюдается быстрое повышение температуры воздуха после калорифера и более медленное — после барабана, причем температура воздуха после барабана всегда остается ниже температуры воздуха после калорифера ( $t_{c2} < t_{c1}$ ). Это объясняется тем, что часть теплоты, полученной воздухом в калорифере, идет на нагревание барабана и через его стенки передается в окружающую среду.

Спустя некоторое время стенки барабана прогреваются и при постоянных потерях теплоты в окружающую среду температура воздуха, выходящего из барабана, становится постоянной, но ниже, чем до барабана ( $t_{c2} < t_{c1}$ ). С этого момента можно начинать испытание установки.

На технических весах взвешивают по указанию преподавателя порцию ( $G_1$ ) увлажненного материала. При загрузке барабана вручную материал засыпают через загрузочное отверстие 19

3. Графический расчет по  $i - d$ -диаграмме: удельного расхода воздуха; удельного расхода теплоты в калорифере.
4. Расчет КПД сушильной установки.

#### Описание экспериментальной установки

Работа проводится на установке (см. рис. 2.23), состоящей из сушильного барабана, вращающегося с определенной частотой (барабанные сушилки применяются для сушки сыпучих материалов); парового пластинчатого калорифера, в котором происходит подогревание сушильного агента (воздуха); вентилятора и системы воздухопроводов с заслонками-шиберами. Материал и воздух движутся в барабане в одном направлении, т. е. сушилка работает по принципу прямотока.

Влажный материал, подвергающийся сушке, поступает внутрь сушильного барабана. На внутренней поверхности барабана по винтовой линии расположены лопасти, с помощью которых материал внутри барабана пересыпается и перемещается вдоль его в потоке горячего воздуха. Высушенный материал собирается в бункере и сыпается через периодически открывающееся разгрузочное отверстие в приемник.

Свежий воздух засасывается вентилятором из помещения и поступает на подогревание в калорифер. На воздуховоде между вентилятором и калорифером установлен психрометр, по показаниям которого ( $t_{c0}$  и  $t'_{m0}$ ) можно определить все параметры свежего воздуха.

В калорифере воздух нагревается паром. Подогретый до определенной температуры воздух поступает из калорифера по воздухопроводу внутрь сушильного барабана. Параметры подогретого воздуха определяют по показанию сухого термометра ( $t_{c1}$ ). Количество воздуха, поступающего в барабан, в зависимости от параметров воздуха, количества и влажности материала регулируют шибером. Из сушильного барабана выходит отработанный воздух, охлажденный и увлажненный, параметры которого можно определить по показаниям психрометра на выходе из барабана ( $t_{c2}$  и  $t'_{m2}$ ).

На установке можно проводить сушку только свежим воздухом (нормальный сушильный процесс) и сушку с частичным возвратом отработанного воздуха (сушка с рециркуляцией). При сушке свежим воздухом шибер 8 должен быть закрыт, а весь отработанный воздух выбрасывается через шибер 10. При сушке с возвратом отработанного воздуха часть его выбрасывается через шибер 10, а часть через шибер 8 направляется к вентилятору, где смешивается со свежим воздухом, поступающим через шибер 3. Смесь воздуха направляется на подогревание в калорифер.

Соотношение количества отработанного и свежего воздуха в смеси (кратность смешивания) регулируется шиберами 3, 8, 10.

Выбор варианта сушки определяется свойствами материала, подвергающегося сушке.

### Методика проведения испытания

Объектом сушки является сыпучий материал (сахар-песок, зерно и др.). Перед началом испытания подготавливают материал: увлажняют путем разбрызгивания распылителем воды. Увлажненный материал выдерживают в течение 10—20 мин для равномерного распределения в нем влаги. Из влажного материала отбирают пробы (по 5 г) в два бюкса (массу бюксов определяют заранее) для определения начальной влажности материала. Бюксы с пробой взвешивают на аналитических весах и ставят в сушильный шкаф, температуру в котором при помощи терморегулятора поддерживают постоянной — равной 105—130°C. Периодически (через каждые 20—30 мин) бюксы вынимают из сушильного шкафа и после охлаждения в эксикаторе взвешивают.

Пробы в бюксах высушивают в сушильном шкафу до постоянной массы, т. е. до тех пор, пока два очередных взвешивания не дадут одинакового результата. Результаты взвешиваний записывают в протокол испытания № 1.

При подготовке установки к испытанию выбирают вариант сушки — нормальный сушильный процесс, т. е. сушка только свежим воздухом. В соответствии с этим открывают шиберы 3, 10, 14 на воздуховодах; шибер 8 должен быть закрыт. Включают вентилятор и открывают кран 2 для отвода конденсата в мерник. В калорифер подают пар. С помощью вентиля 11 устанавливают избыточное давление пара по манометру около 130 кПа (1,3 кгс/см<sup>2</sup>), продувают конденсатоотводчик.

С этого момента наблюдается быстрое повышение температуры воздуха после калорифера и более медленное — после барабана, причем температура воздуха после барабана всегда остается ниже температуры воздуха после калорифера ( $t_{c2} < t_{c1}$ ). Это объясняется тем, что часть теплоты, полученной воздухом в калорифере, идет на нагревание барабана и через его стенки передается в окружающую среду.

Спустя некоторое время стенки барабана прогреваются и при постоянных потерях теплоты в окружающую среду температура воздуха, выходящего из барабана, становится постоянной, но ниже, чем до барабана ( $t_{c2} < t_{c1}$ ). С этого момента можно начинать испытание установки.

На технических весах взвешивают по указанию преподавателя порцию ( $G_1$ ) увлажненного материала. При загрузке барабана вручную материал засыпают через загрузочное отверстие 19

Количество испаренной из материала влаги (в кг/с)

$$U = G_1 \frac{W_1 - W_f}{100 + W_f} \quad (2.131)$$

или

$$U = G_2 \frac{W_1 - W_f}{100 + W_f},$$

где  $G_1$  — масса поступившего в сушилку влажного материала, кг/с.

$$G_1 = G'_1/\tau, \quad (2.132)$$

$G_2$  — масса высушенного материала, кг/с.

$$G_2 = G'_2/\tau,$$

$\tau$  — продолжительность испытания, с.

Количество испаренной влаги может быть определено по формулам

$$\begin{aligned} U &= G_1 - G_2; \\ U &= U''/\tau. \end{aligned} \quad (2.133)$$

Процесс сушки в  $i - d$ -диаграмме строят по средним данным испытания сушильной установки из протокола № 2. Предварительно определяют истинные значения  $t_{w0}^0$  и  $t_{w2}^0$  [см. работу № 6, формула (2.105)].

Пример построения процесса сушки в  $i - d$ -диаграмме приведен на рис. 2.30.

На пересечении линии  $t_{w0}^0 = \text{const}$  и  $t_{w2}^0 = \text{const}$  находят точку А, характеризующую состояние свежего воздуха. Для этого воздуха определяют удельное влагосодержание  $d_0$ , удельную энтальпию  $i_0$  и относительную влажность  $\varphi_0$ . Так как в процессе нагревания удельное влагосодержание свежего воздуха не изменяется,  $d_1 = d_0$ , то положение точки В, характеризующей состояние воздуха после калорифера, определится пересечением линии  $d_0 = \text{const}$  и линии  $t_{w1}^0 = \text{const}$ . Для воздуха в этой точке определяют удельную энтальпию  $i_1$  и относительную влажность  $\varphi_1$ .

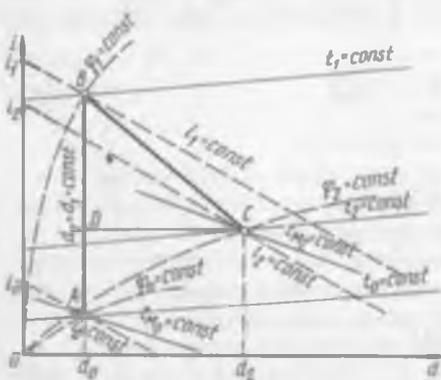


Рис. 2.30. Пример построения процесса сушки в  $i - d$ -диаграмме по данным испытания

На пересечении линии  $t_{w2}^0 = \text{const}$  и  $t_{w0}^0 = \text{const}$  на-

ходят точку  $C$ , характеризующую состояние отработанного воздуха. Для воздуха в этой точке определяют удельное влагосодержание  $d_2$ , удельную энтальпию  $i_2$  и относительную влажность  $\varphi_2$ .

Таким образом, на  $i-d$ -диаграмме получены три точки: точка  $A$ , характеризующая состояние (параметры) воздуха перед калорифером;

точка  $B$ , характеризующая состояние воздуха после калорифера;

точка  $C$ , характеризующая состояние отработанного воздуха после сушилки.

Линия  $AB$  показывает изменение параметров воздуха в процессе подогревания в калорифере. Линия  $BC$  изображает изменение параметров воздуха в процессе сушки. Весь процесс изображается ломаной линией  $ABC$ .

Аналитический расчет удельного расхода воздуха осуществляют по формулам (2.125). Полный расход воздуха

$$L = lu.$$

Удельный расход теплоты в калорифере находят по формулам (2.126).

Полный расход теплоты в калорифере

$$Q_{\text{кал}} = q_{\text{кал}} U. \quad (2.134)$$

Графический расчет производят по  $i-d$ -диаграмме, на основании которой построен процесс сушки (см. рис. 2.30).

Удельный расход воздуха

$$l = 1000 / (CD M_d), \quad (2.135)$$

где  $CD$  — длина отрезка на  $i-d$ -диаграмме, мм (см. рис. 2.30);  $M_d$  — масштаб оси удельного влагосодержания на  $i-d$ -диаграмме.

Удельный расход теплоты в калорифере

$$q_{\text{кал}} = (AB/CD) m, \quad (2.136)$$

где  $AB$  — длина отрезка на  $i-d$ -диаграмме, мм;  $m$  — масштабный фактор диаграммы.

$$m = (1000^M) / M_d,$$

здесь  $M_i$  — масштаб оси удельной энтальпии.

Результаты аналитического и графического расчетов записывают в таблицу и определяют процент расхождения.

Показатели	Данные аналитического расчета	Данные графического расчета	Расхождение, %
------------	-------------------------------	-----------------------------	----------------

Удельный расход воздуха /  
Удельный расход теплоты в калорифере  
 $q_{уд}$

КПД сушильной установки определяют по отношению  $\eta$  к  $q_{уд}$ .

#### Материалы для самоподготовки

№ п/п	Элемент изучаемого материала	Характер мыслительной деятельности и цели контроля	
		при допуске к выполнению лабораторной работы	при защите лабораторной работы
1	Цель работы	Воспроизведение целей работы	
2	Влажность материала	Смысл и единицы измерения Воспроизведение формулы для расчета Методика определения	
3	Удельный расход воздуха	Смысл и единицы измерения Величины, влияющие на удельный расход воздуха	Анализ влияния отдельных величин на удельный расход воздуха Анализ путей снижения удельного расхода воздуха
4	Полный расход воздуха	Смысл и единицы измерения Величины, влияющие на полный расход воздуха Показатели, на которые влияет полный расход воздуха	Анализ путей снижения полного расхода воздуха
5	Удельный расход теплоты в калорифере	Смысл и единицы измерения Величины, влияющие на удельный расход теплоты в калорифере	Анализ влияния отдельных величин на удельный расход теплоты в калорифере Пути снижения удельного расхода теплоты в калорифере Обоснование целесообразных путей снижения удельного расхода теплоты в калорифере
6	Полный расход теплоты в калорифере	Смысл и единицы измерения Величины, влияющие на полный расход теплоты в калорифере	Анализ путей снижения полного расхода теплоты в калорифере

№ п/п	Элемент изучаемого материала	Характер мыслительной деятельности и цели контроля	
		при допуске к выполнению лабораторной работы	при защите лабораторной работы
7	Графическое изображение процесса сушки в $i-d$ -диаграмме	Показатели, на которые влияет полный расход теплоты в калорифере Изображение процесса сушки в $i-d$ -диаграмме Смысл точек и линий при построении процесса в $i-d$ -диаграмме	Анализ сопоставления нескольких процессов сушки на $i-d$ -диаграмме по удельному расходу воздуха, удельному расходу теплоты в калорифере и интенсивности процесса
8	Схема установки	Название и назначение отдельных элементов установки Последовательность прохождения воздуха в установке Последовательность прохождения материала в установке Приборы, используемые в работе Назначение и места установки приборов	—
9	Методика проведения работы	Последовательность операций и измерений при выполнении работы Назначение отдельных операций	Анализ использования для расчетов результатов измерений при выполнении работы
10	Техника безопасности	Места в установке и операции, требующие особого внимания и осторожности при работе	—

### Работа № 10. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ

Производство продуктов питания, обладающих высоким качеством и пищевой ценностью, является одной из важных задач, стоящих перед пищевой отраслью АПК. Известно, что традиционные методы консервирования (тепловая сушка, стерилизация, копчение и др.) приводят к необратимым изменениям перерабатываемого сырья. Сублимационная сушка обеспечивает наилучшее сохранение нативных свойств продуктов по сравнению с другими методами сушки.

**С у б л и м а ц и я** (возгонка) — это переход влаги из твердо-

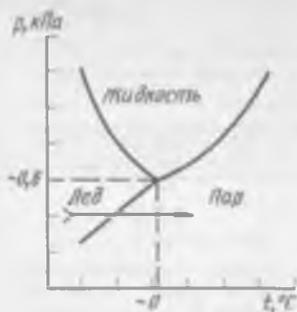


Рис. 2.31. Диаграмма фазового состояния воды

го состояния (лед) в пар, минуя жидкую фазу. Этот процесс протекает ниже тройной точки (рис. 2.31), поэтому подлежащий сушке продукт предварительно замораживают или подвергают самозамораживанию в сублимационной вакуум-камере. Обычно для сушки пищевых продуктов в камере создают остаточное давление около 133,3 Па, при этом температура замораживания продукта достигает минус 20—30 °С.

В процессе сушки в зону сублимации подводят энергию, достаточную для компенсации отнимаемой от продукта теплоты фазового превращения. Подвод энергии в процессе сушки осуществляется разными способами — кондукцией (от греющих поверхностей) и с использованием энергии электромагнитного поля (инфракрасными лучами или в поле токов высокой частоты).

Количество подведенной энергии при этом не должно превышать определенной величины во избежание размораживания продукта во время сушки. В конце сушки температура материала может достигать 40—50 °С. Испаренная влага в виде пара отводится в конденсатор-вымораживатель (десублиматор), где она конденсируется в твердое состояние при температуре около минус 30—40 °С.

Большое значение имеют лучистая составляющая потока и кондуктивный подвод теплоты, которые интенсифицируют испарение. Все составляющие теплового потока — лучистая, конвективная и кондуктивная — связаны между собой, и интенсификация одного из способов подвода теплоты отражается на других составляющих теплового потока.

Важное значение имеет тепло- и массоперенос внутри продукта в процессе сублимационной сушки. Зона сублимации углубляется, и когда удаляется остаточная влага, а температура материала повышается до температуры среды, процесс сушки считают законченным.

Характеристику кинетики углубления зоны сублимации в процессе сушки можно получить на основании анализа полей давления, температуры и влажности внутри материала. Экспериментально обнаружено изменение влагосодержания в слое, лежащем за зоной сублимации, что свидетельствует о переносе влаги во всем объеме капиллярно-пористого тела, характерном для процесса сублимации.

При сублимационной сушке внутри материала возникает градиент общего давления пара, что обусловлено несоответствием

интенсивности образования пара в зоне сублимации и скорости переноса его через сухой слой материала.

Таким образом, при сублимационной сушке перенос вещества происходит в определенной мере за счет градиента общего давления наряду с движением потока вещества под действием градиентов влагосодержания и температуры.

### **Цель работы**

1. Изучение кинетики сублимационной сушки пищевых продуктов и выяснение особенностей этого способа сушки.
2. Ознакомление с контрольно-измерительной аппаратурой, применяемой в сублимационных установках.
3. Построение по результатам испытаний кривых сушки и кривых скорости сушки.

### **Описание экспериментальной установки**

Сублимационная сушильная установка с терморadiaционным подводом теплоты (рис. 2.32) состоит из трех основных элементов: сублимационной камеры, вакуум-насоса и конденсаторов-вымораживателей.

Сублимационная камера 13 прямоугольной формы оснащена герметически закрывающейся дверцей из оргстекла, что обеспечивает визуальное наблюдение за процессом сушки. Подвод теплоты осуществляется с помощью нагревателей 14 в виде нихромовых спиралей, размещенных на контактных рамках с алюминиевыми отражателями. Температура нагревателей регулируется терморегулятором, который вмонтирован в панель установки.

В течение процесса сушки осуществляется контроль за убылью массы в материале посредством тензиметрического весового механизма, встроенного в сублимационную камеру. Весовой механизм 1 имеет шкалу от 0 до 500 г.

Охлаждаемая поверхность встроенных конденсаторов-вымораживателей 15 выполнена в виде змеевиков, в которых циркулирует холодильный агент (хладон-12). Лед намораживается на наружной поверхности труб. Конденсаторы-вымораживатели размещены непосредственно в сушильной камере, что позволяет максимально приблизить поверхность сублимации к поверхности конденсации и устранить сопротивление вакуум-трубопроводов, которое достигает значительной величины при расположении конденсатора вне сублиматора.

Для откачивания неконденсирующихся газов предназначен масляный ротационный насос.

На передней панели установки смонтированы термopарный

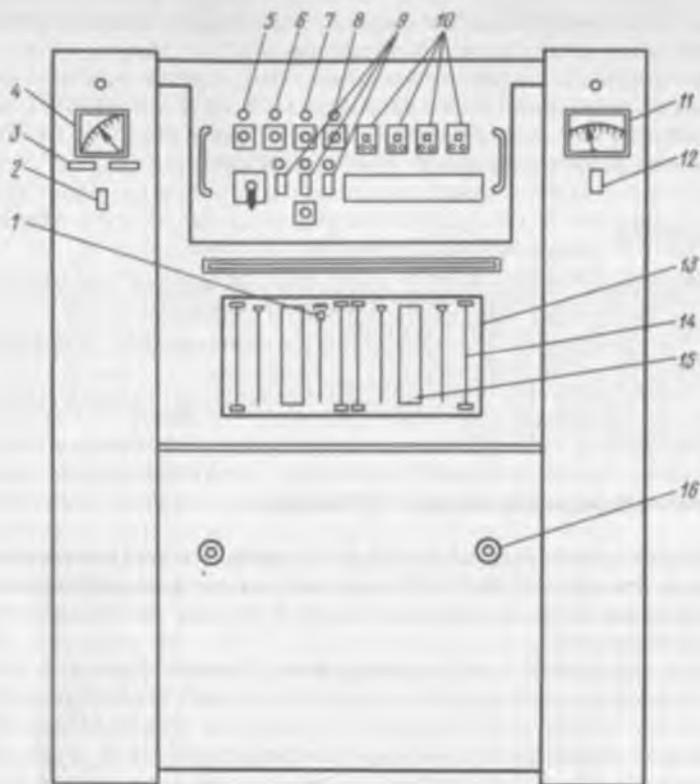


Рис. 2.32. Схема сублимационной сушильной установки:

1 — весовой механизм; 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12 — тумблеры; 4 — термометр сопротивления; 11 — вакуумметр; 13 — сублимационная камера; 14 — нагреватели; 15 — конденсаторы вымораживателя; 16 — вакуум-насос

вакуумметр 11, показывающий прибор 4 с задатчиком температуры нагревательных рамок для измерения температуры стенок конденсатора-вымораживателя и температуры высушиваемого материала.

### Методика проведения испытания

Перед началом испытания установку подготавливают к пуску. Для этого включают общее электропитание установки и компрессор холодильной машины (при помощи тумблера 7). Устанавливают весы на отметку 0. По достижении в конденсаторе температуры минус 35 °С помещают продукт (или кассету с про-

дуктом) в сублимационную камеру, закрывают дверцу сублимационной камеры 13, включают вакуум-насос с помощью тумблера 5 и создают вакуум в системе. По достижении в системе остаточного давления 13,3—66,5 Па (0,1—0,5 мм рт. ст.) включают нагревание излучателей (с помощью тумблеров 9). Затем включают измерительные и регулирующие приборы (тумблеры 2, 3, 10, 12). После завершения процесса сушки перекрывают вентиль вакуум-насоса, выключают вакуум-насос с помощью тумблера 6 и нагревание излучателей тумблером 9, а также все приборы. Развакуумируют систему, открывают вентиль для спуска конденсата и выключают холодильный агрегат с помощью тумблера 8. Выключают вакуум-насос 16 и общее электропитание установки.

Объектом для изучения кинетики сушки могут быть разные материалы, например дрожжи, экстракты, пюре и т. д. Перед началом испытания подготавливают образец материала: на подложку намазывают тонкий (1—3 мм) слой материала и помещают в морозильную камеру. Из этой же партии материала с измеренной ранее массой отбирают две пробы (навески по 3—5 г) для определения начальной влажности. (Методику определения см. в работе № 7.) Результаты определения записывают в протокол № 1.

#### Протокол № 1

Образец	Масса бюксы, г <sub>б</sub>	Масса навески с бюксы до высушивания г <sub>1</sub>	Масса навески до высушивания г <sub>1</sub>	Масса навески с бюксы после высушивания, г			
				г <sub>1</sub> <sup>I</sup>	г <sub>1</sub> <sup>II</sup>	г <sub>1</sub> <sup>III</sup>	г <sub>1</sub> <sup>IV</sup>

1  
2

Продолжение

Образец	Масса сухой навески г <sub>2</sub>	Масса влаги в навеске до сушки, г	Влажность навески, %	Средняя влажность материала W <sub>ср</sub> , %
---------	------------------------------------	-----------------------------------	----------------------	---

1  
2

Примечание. Индексы I—IV означают первое, второе и т. д. взвешивания

После достижения температуры на поверхности конденсатора минус 35 °С измеряют начальную массу предварительно замороженного продукта, подлежащего сушке, и помещают его в сублимационную камеру. В процессе испытания через каждые

5 мин измеряют массу продукта, из которого сублимируется влага. Результаты испытаний записывают в протокол № 2. На основании полученных данных строят кривые сушки.

Протокол № 2

№ п/п	Время замера $\tau$	Масса образца $g_n$ , г	Убыль массы образца $\Delta g$ , г	Масса влаги $g_{вл}$ , г	Влажность материала $W_i$ , %	Давление в камере, Па
1	0					
2						
3						
4						

### Обработка результатов испытания

На основании данных протокола № 2 на миллиметровой бумаге строят кривую сушки: на оси ординат откладывают значения влажности  $W^x$ , начиная от начальной  $W_i^1$  влажности, по оси абсцисс — время с начала эксперимента  $\tau$ . Влажность материала  $W_n^x$  (в %) в процессе сушки определяют для  $n$ -го замера по формуле

$$W_n^x = (g_{вл}/g_c) \cdot 100, \quad (2.137)$$

где  $g_{вл}$  — масса влаги в образце в  $n$ -й момент времени, г;  $g_c$  — масса сухого вещества образца, г.

При этом

$$g_{вл} = g_n - g_c, \quad (2.138)$$

где  $g_n$  — масса образца в данный момент (см. протокол испытания № 2).

$$g_n = g_{n-1} - \Delta g, \quad (2.139)$$

где  $g_{n-1}$  — масса образца в момент предыдущего замера, г;  $\Delta g$  — убыль массы влаги между двумя соседними замерами, г.

Масса сухого вещества образца

$$g_c = g_i / (1 + W_i^1/100). \quad (2.140)$$

Методом графического дифференцирования кривой сушки определяют скорость сушки в десяти точках и полученные данные вносят в протокол № 3.

Параметр	Номер точки на кривой сушки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Влажность  $W^c$ , %

Скорость сушки  $dW^c/dt$ , %/мин

По данным протокола № 3 на миллиметровой бумаге строят кривую скорости сушки  $dW^c/dt = f(W^c)$ , откладывая на оси ординат скорость сушки (в %/мин), а по оси абсцисс — влажность материала (в %). На полученном графике отмечают критическую точку и соответствующую ей критическую влажность  $W_{кр}^c$ , разделяющую процесс сушки на два периода.

Вопросы для самопроверки\*

1. В чем заключаются сущность и особенность механизма процесса сублимационной сушки?
2. Каковы основные элементы сублимационной установки и их устройство?
3. Каковы правила пуска и эксплуатации сублимационной установки?
4. Какая основная контрольно-измерительная аппаратура применяется в сублимационных установках?
5. Что характеризует кривая сушки, как ее строят?
6. Что характеризует кривая скорости сушки, как ее строят?
7. Чем объяснить существование двух периодов сушки, как их разграничить?

**Работа № 11. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ  
ИНФРАКРАСНЫМИ ЛУЧАМИ**

Терморadiационная сушка инфракрасными лучами — прогрессивный способ обезвоживания влажных материалов и продуктов. Инфракрасное (невидимое) излучение имеет ту же физическую природу, что и световое излучение, — это электромагнитные колебания, но с разной длиной волны. К видимому свету относятся излучения с длиной волны от 0,38 до 0,77 мкм, а к инфракрасной области электромагнитного спектра — от 0,77 до 340 мкм\*\*.

В качестве генераторов инфракрасного излучения применяют специальные зеркальные лампы (температура нити около 2200—2500 К), кварцевые трубки (температура нити около 2500 К),

\* См. Гуйго Э. И., Журавская Н. К., Каухчешвили Э. И. Сублимационная сушка в пищевой промышленности. — М., 1972. — 433 с.

\*\* Этот диапазон волн инфракрасного излучения дается по терминологии цветотехники, рекомендованной Комитетом технической терминологии АН СССР. Иногда в литературе рассматриваются три области инфракрасного излучения: близкая (0,74—2,5 мкм), средняя (2,6—50 мкм), дальняя (51—2000 мкм).

электронагревательные элементы сопротивления (температура поверхности 873—1173 К) и газовые горелки инфракрасного излучения, в которых происходит беспламенное сжигание газа (температура поверхности 1073—1173 К).

Электромагнитное излучение в инфракрасной области обусловлено переходом электронов в атомах генератора излучения с одних орбит на другие, в результате чего выделяются кванты энергии (фотоны).

Применение инфракрасного излучения значительно интенсифицирует многие технологические процессы — сушку, выпечку, обжарку, полимеризацию и др. — вследствие значительного увеличения плотности теплового потока на поверхности облучаемого материала и проникновения инфракрасных лучей внутрь материала. Инфракрасные лучи пробегают путь от генератора излучения до объекта облучения в миллионные доли секунды и, не встречая сопротивления пограничного слоя, что наблюдается при конвективной сушке, обеспечивают эффективное нагревание материала за счет интенсификации движения атомов и молекул в его поверхностных и глубже расположенных слоях.

В зависимости от свойств облучаемого материала и температуры излучателя, от которой зависит длина волны, инфракрасные лучи способны проникать в толщу материала. Согласно закону Вина, при повышении температуры излучателя длина волны максимума энергии излучения уменьшается:

$$\lambda = 2886/T,$$

где  $\lambda$  — длина волны максимума излучения, мкм;  $T$  — температура генератора излучения, К.

Экспериментально показано, что для многих пищевых продуктов с уменьшением длины волны глубина проникновения в материал увеличивается. Проницаемость материала зависит от многих факторов: структуры, оптических и терморадационных характеристик его поверхности, влагосодержания и форм связи влаги в материале, пористости материала и т. д.

Для пищевых продуктов глубина проникновения коротковолновых инфракрасных лучей составляет 1—7 мм и достигает 12 мм и более (пшеничный хлеб). Чем глубже расположен слой, тем меньше доля лучистой энергии, проникающей в него; приближенно можно принять, что пропускание энергии излучения подчиняется экспоненциальной зависимости

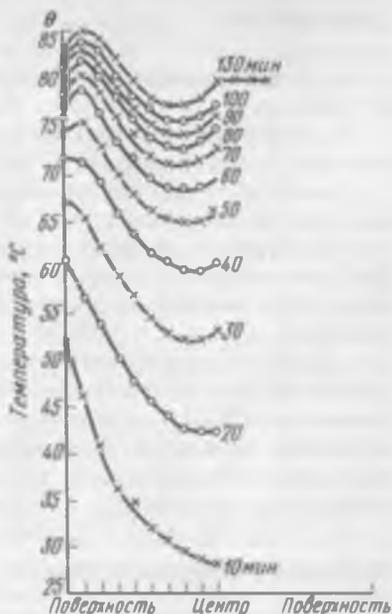
$$T_{\lambda} = T_0 e^{-b_{\lambda} x}, \quad (2.141)$$

где  $T_{\lambda}$  — проницаемость слоя, %;  $T_0$  — доля лучистой энергии, воспринятой поверхностью материала, % ( $T_0 = 1 - R_0$ ), где  $R_0$  — величина, учитывающая отражение лучей поверхностью материала);  $e$  — основание натурального логарифма;  $b_{\lambda}$  — коэффициент ослабления лучей (коэффициент экстинкции), м<sup>-1</sup>;  $x$  — глубина расположения (толщина) слоя, м.

Рис. 2.33. Температурное поле при ИК-облучении толстого материала

Значительная плотность теплового потока на поверхности материала, а также проникновение инфракрасных лучей в материал существенно влияют на его температурное поле в процессе сушки.

Температурное поле материала при инфракрасном облучении зависит от проницаемости материала, его толщины и температуры среды в рабочей камере (рис. 2.33). Из рисунка видно, что температура слоя толстого материала, расположенного на некоторой глубине, выше, чем температура поверхности материала за счет отдачи теплоты в окружающую среду.



В том случае, когда температура среды  $t_c$  ниже температуры поверхности материала  $t_n$ , который характеризуется сравнительно высокой влажностью, увеличение скорости движения воздуха вызывает снижение скорости сушки в первом периоде за счет более интенсивной теплоотдачи с поверхности материала. Характер кривых скорости сушки во втором периоде зависит от свойств и размеров материала, а также от режима облучения.

Эффективность сушки часто повышается при применении осциллирующего режима — прерывистого облучения и комбинированного терморрадиационно-конвективного метода. Прерывистое облучение дает значительный эффект как в отношении сокращения продолжительности процесса и расхода энергии, так и в части повышения качества продуктов при сушке толстых термолabileльных материалов, в которых создаются высокие градиенты температуры. На процесс сушки, как типичный необратимый процесс, решающее влияние оказывает начальный импульс внешнего воздействия на влажный материал. Эффективность осциллирующего режима можно рассматривать как воздействие суммы начальных импульсов.

Применение комбинированных способов сушки с использованием инфракрасного излучения весьма перспективно для широкого внедрения в пищевую промышленность.

## Цель работы

1. Ознакомление с разными генераторами инфракрасного излучения.

2. Изучение кинетики процесса сушки и температурного поля влажного материала при нагревании инфракрасными лучами.

Вначале студентов знакомят с основными типами генераторов инфракрасного излучения: зеркальными лампами, кварцевыми трубчатыми лампами, электронагревательными элементами сопротивления и газовыми горелками с беспламенным сжиганием газа. Желательно продемонстрировать основные генераторы в действии.

Экспериментальную работу проводят на специальном стенде, позволяющем вести сушку инфракрасными лучами и комбинированными терморadiационно-конвективными способом. В качестве стенда может быть использована воздушная циркуляционная сушилка (см. работу № 7) с установкой в сушильной камере генератора излучения.

## Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 2.34) представляет собой замкнутую циркуляционную сушилку, состоящую из сушильной камеры, излучателя, электрокалорифера, парогенератора и вентилятора. Желательно применять два типа генераторов излучения: светлый (например, кварцевый излучатель) и темный (например, керамическая плита с электроспиралью) с тем, чтобы сравнить интенсивность сушки при использовании разных типов излучателей. Электрокалорифер и парогенератор служат для нагревания и увлажнения воздуха до требуемой температуры и влажности.

Для контроля изменения массы материала в процессе сушки применяют технические весы с ценой деления 0,5 г. Температура воздуха регулируется путем автоматического включения и выключения секций калорифера; в качестве датчика служит контактный термопреобразователь. Температура излучателя регулируется автоматически при помощи электронного регулятора.

В качестве объекта сушки может быть взят зернистый (например, кварцевый песок, сахарный песок) или кусковой (например, хлеб) материал. Для зернистого материала целесообразно использовать кассету конструкции кафедры сушильных и теплообменных устройств МЭИ. Кассета (типа «труба в трубе») состоит из двух цилиндрических пластмассовых коробок, между которыми находится теплоизоляция (например, шлаковая вата). Применение тепловой изоляции и пластмассы (как негигроскопического материала) обусловлено стремлением снизить возмож-

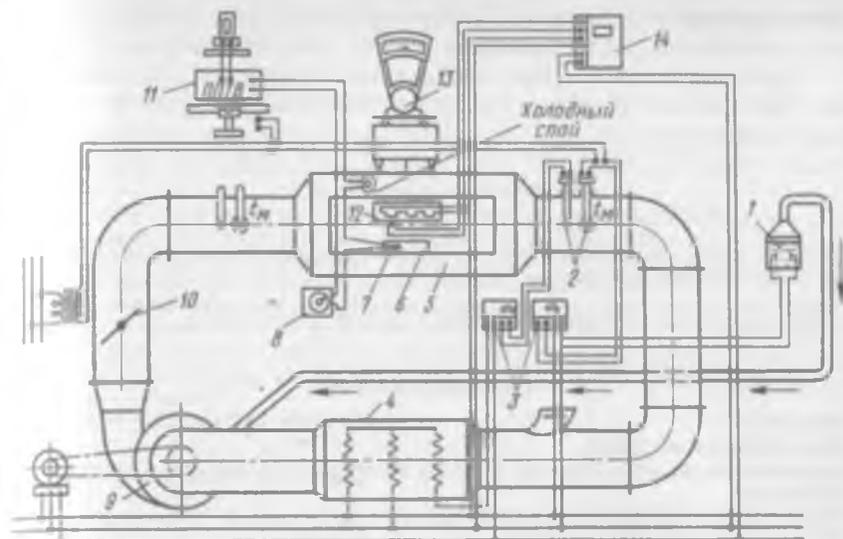


Рис. 2.34. Схема экспериментальной установки:

1 — парогенератор; 2 — психрометр; 3 — реле; 4 — электрокалорифер; 5 — сушильная камера; 6 — образец материала; 7 — термопреобразователь; 8 — переключатель; 9 — центробежный вентилятор; 10 — дроссель-клапан; 11 — потенциометр; 12 — излучатель; 13 — весы; 14 — электронный регулятор

ные ошибки при измерении температуры высушиваемого материала при помощи термопреобразователей. Для измерения температуры в разных слоях материала кассета имеет подвижное дно, на котором укреплены стойки прямоугольного сечения с отверстиями для датчиков.

### Методика проведения испытания

Испытание выполняют в следующем порядке. Проверяют готовность установки и контрольно-измерительной и регулировочной аппаратуры к испытанию, в частности устанавливают регулятор на заданную температуру излучателя, а контактный термоэлектрический преобразователь на требуемую температуру воздуха.

При подготовке материала для сушки берут образец его, отбирают пробу для определения влажности (кладут ее в бюкс и плотно закрывают крышкой) и взвешивают образец; насыпают (кладут) образец в кассету, предварительно установив туда датчики; ставят кассету на весы. После этого запускают вентилятор, включают электрокалорифер и генератор излучения. Про-

вводят отсчеты показаний весов и запись температуры через каждые 10—15 мин в зависимости от толщины образца.

Опыт заканчивают при достижении заданной массы материала ( $G_2$ ), соответствующей требуемой конечной влажности. Заданная масса (в г)

$$G_2 = G_1 \frac{100 - W_1}{100 - W_2}, \quad (2.142)$$

где  $G_1$  — масса образца до сушки, г;  $W_1$  — начальная влажность образца, %;  $W_2$  — конечная влажность образца, %.

Результаты наблюдений записывают в протокол.

#### Протокол испытания

Материал

Масса образца до сушки

Начальная влажность материала  $W_1$  (% к общей массе) или  $W_1^c$  (% к массе сухого материала)

Масса влаги в материале до сушки  $G_{вв}$

Масса сухого вещества материала  $G_{св}$

Конечная влажность материала  $W_2$  или  $W_2^c$

Режим сушки:

температура воздуха

влажность

тип генератора излучения

температура излучателя

Облучение:

непрерывное

прерывистое (интервал... мин) — осциллирующий режим

Время замера	Убыль массы, г	Влажность материала, %		Масса влаги в материале, г	Температура материала в точках							
					1	2	3	4	5	6		
		$W$	$W^c$		$mB$	$t, ^\circ C$	$mB$	$t, ^\circ C$	$mB$	$t, ^\circ C$	$mB$	$t, ^\circ C$

#### Обработка результатов испытания

По данным измерений строят кривые сушки  $W^c = f(\tau)$  при разных режимах процесса. Методом графического дифференцирования\* строят соответствующие кривые скорости сушки. По данным измерения температуры строят температурные кривые  $t = f(\tau)$  для разных точек (слоев) материала (с 1 по 6). Затем строят кривые распределения температуры по сечению образца

\* См. работу № 7.

$t = f(x)$  (где  $x$  — толщина слоя в мм) в разные моменты времени, чтобы получить картину температурного поля материала.

#### Вопросы для самопроверки

1. Объясните физическую сущность инфракрасного излучения.
2. Каковы преимущества терморадационной сушки по сравнению с конвективной?
3. Дайте характеристику основных типов генераторов излучения.
4. Каковы области применения инфракрасного излучения?
5. Какова зависимость между температурой генератора излучения, длиной волны и глубиной проникновения лучей в пищевые продукты?
6. В чем заключается особенность температурного поля при сушке инфракрасными лучами?
7. Каковы основные элементы экспериментальной установки?
8. Какова методика построения кривых распределения температуры в разных точках образца?
9. Дайте анализ опытных данных.

#### Список рекомендуемой литературы

- Гинзбург А. С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. — М.: Пищевая промышленность, 1966. — 408 с.
- Гинзбург А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. — М.: Агропромиздат, 1985. — 336 с.
- Ильясов С. Г., Красников В. В. Физические основы инфракрасного облучения пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1978. — 359 с.
- Лебедев П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок. — М.: Госэнергониздат, 1963. — 320 с.

#### ПРОЦЕСС ПЕРЕГОНКИ

Многие пищевые продукты представляют собой смеси двух или более жидкостей, которые по ходу технологического процесса необходимо разделить. Одним из наиболее распространенных способов разделения смеси жидкостей является перегонка.

Разделение путем перегонки применяется для смеси жидкостей, которые обладают разной летучестью, т. е. при одной и той же температуре характеризуются разной упругостью пара; другими словами, смесь состоит из жидкостей с разной температурой кипения (при том же барометрическом давлении). Жидкость с более низкой температурой кипения называется легколетучим, или низкокипящим, компонентом. Жидкость с более высокой температурой кипения называется труднолетучим, или высококипящим, компонентом.

Сущность процесса перегонки состоит в том, что разделяемая смесь нагревается до кипения; при этом вследствие разной летучести компоненты смеси переходят в пар в разное время и в неравных количествах. Состав образующегося пара и оставшейся жидкости отличается от состава исходной смеси. Пар будет со-

водят отсчеты показаний весов и запись температуры через каждые 10—15 мин в зависимости от толщины образца.

Опыт заканчивают при достижении заданной массы материала ( $G_2$ ), соответствующей требуемой конечной влажности. Заданная масса (в г)

$$G_2 = G_1 \frac{100 - W_1}{100 - W_2}, \quad (2.142)$$

где  $G_1$  — масса образца до сушки, г;  $W_1$  — начальная влажность образца, %;  $W_2$  — конечная влажность образца, %.

Результаты наблюдений записывают в протокол.

#### Протокол испытания

Материал

Масса образца до сушки

Начальная влажность материала  $W_1$  (% к общей массе) или  $W_1'$  (% к массе сухого материала)

Масса влаги в материале до сушки  $G_{в.д.}$

Масса сухого вещества материала  $G_{с.в.}$

Конечная влажность материала  $W_2$  или  $W_2'$

Режим сушки:

температура воздуха

влажность

тип генератора излучения

температура излучателя

Облучение:

непрерывное

прерывистое (интервал...мин) — осциллирующий режим

Время замера	Убыль массы, г	Влажность материала, %		Масса влаги в материале, г	Температура материала в точках						
					1	2	3	4	5	6	
					мВ $t_1$ °C	мВ $t_2$ °C	мВ $t_3$ °C	мВ $t_4$ °C	мВ $t_5$ °C	мВ $t_6$ °C	

#### Обработка результатов испытания

По данным измерений строят кривые сушки  $W^* = f(\tau)$  при разных режимах процесса. Методом графического дифференцирования\* строят соответствующие кривые скорости сушки. По данным измерения температуры строят температурные кривые  $t = f(\tau)$  для разных точек (слоев) материала (с 1 по 6). Затем строят кривые распределения температуры по сечению образца

\* См. работу № 7.

$t = f(x)$  (где  $x$  — толщина слоя в мм) в разные моменты времени, чтобы получить картину температурного поля материала.

### Вопросы для самопроверки

1. Объясните физическую сущность инфракрасного излучения.
2. Каковы преимущества терморadiационной сушки по сравнению с конвективной?
3. Дайте характеристику основных типов генераторов излучения.
4. Каковы области применения инфракрасного излучения?
5. Какова зависимость между температурой генератора излучения, длиной волны и глубиной проникновения лучей в пищевые продукты?
6. В чем заключается особенность температурного поля при сушке инфракрасными лучами?
7. Каковы основные элементы экспериментальной установки?
8. Какова методика построения кривых распределения температуры в разных точках образца?
9. Дайте анализ опытных данных.

### Список рекомендуемой литературы

Гинзбург А. С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. — М.: Пищевая промышленность, 1966. — 408 с.

Гинзбург А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. — М.: Агропромиздат, 1985. — 336 с.

Ильсов С. Г., Красников В. В. Физические основы инфракрасного облучения пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1978. — 359 с.

Лебедев П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок. — М.: Госэнергоиздат, 1963. — 320 с.

## ПРОЦЕСС ПЕРЕГОНКИ

Многие пищевые продукты представляют собой смеси двух или более жидкостей, которые по ходу технологического процесса необходимо разделить. Одним из наиболее распространенных способов разделения смеси жидкостей является перегонка.

Разделение путем перегонки применяется для смеси жидкостей, которые обладают разной летучестью, т. е. при одной и той же температуре характеризуются разной упругостью пара; другими словами, смесь состоит из жидкостей с разной температурой кипения (при том же барометрическом давлении). Жидкость с более низкой температурой кипения называется легколетучим, или низкокипящим, компонентом. Жидкость с более высокой температурой кипения называется труднолетучим, или высококипящим, компонентом.

Сущность процесса перегонки состоит в том, что разделяемая смесь нагревается до кипения; при этом вследствие разной летучести компоненты смеси переходят в пар в разное время и в неравных количествах. Состав образующегося пара и оставшейся жидкости отличается от состава исходной смеси. Пар будет со-

вторению процессов однократного испарения и конденсации пара, причем каждый раз состав жидкости по низкокипящему компоненту ухудшается, температура кипения повышается и содержание низкокипящего компонента в дистилляте уменьшается, приближаясь к содержанию его в исходной смеси.

Простая перегонка применяется в том случае, когда не требуется очень полное разделение смеси и когда температуры кипения компонентов сильно различаются.

### **Цель работы**

1. Изучение процесса простой перегонки.
2. Экспериментальное определение состава и количества дистиллята и кубового остатка.
3. Расчет расхода греющего пара по данным испытания.
4. Сравнение результатов испытания с расчетными данными.

### **Описание экспериментальной установки**

Изучение процесса проводят на установке (рис. 2.37), состоящей из перегонного куба 12, в который из напорного бака 10 заливают порцию исходной смеси, подвергающейся разделению.

Нагревание смеси в кубе в течение процесса производят греющим паром, поступающим в змеевик 6. Количество пара регулируют вентилем 7, давление измеряют манометром 8. Конденсат пара через конденсатоотводчик 4 стекает в мерник 2.

Образующийся при кипении смеси пар отводится из куба в холодильник-конденсатор 21, давление этого пара определяют по манометру 11. Проходя по змеевику холодильника, пар конденсируется за счет отдачи теплоты протекающей в корпусе охлаждающей воде. Полученный дистиллят охлаждают до определенной температуры, которую измеряют термометром 22. Для измерения температуры охлаждающей воды на входе и выходе из холодильника предназначены термометры 15 и 20. Расход охлаждающей воды определяют с помощью расходомера или мерника 26.

Дистиллят непрерывно стекает в поочередно соединяемые с холодильником мерники 16.

### **Методика проведения испытания**

Для приготовления подлежащей разделению начальной смеси из этилового спирта и воды определенного состава (по массе) берут 40 % спирта ( $x_n = 0,4$ ) и 60 % воды. Готовую смесь заливают в напорный бак 10. При открытом вентиле 9 порцию (на-

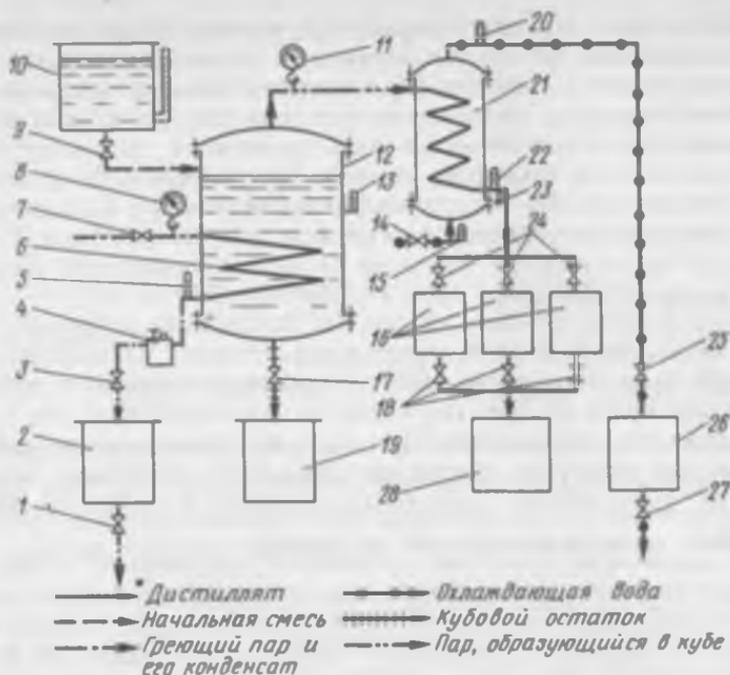


Рис. 2.37. Схема установки для простой перегонки:

1, 3, 17, 18, 25, 27 — краны; 7, 9, 14, 24 — вентили; 2, 16, 19, 26 — мерники; 4 — конденсатоотводчик; 5, 13, 15, 20, 22 — термометры; 6 — змеевик; 8, 11 — манометры; 10 — напорный бак; 12 — перегонный куб; 21 — конденсатор; 23 — пробный кран; 28 — сборник

пример, 80 л) сливают из напорного бака в куб 12 (кран 17 при этом должен быть закрыт). Количество залитой смеси  $G_n$  определяют по водомерному стеклу напорного бака.

При известном составе начальной смеси по низкокипящему компоненту ( $x_n = 0,4$ ) по приложению 8 находят температуру кипения смеси  $t_{\text{кипо}}$ .

Затем открывают кран 3 на трубопроводе для отвода конденсата, вентиль 14 и кран 25 на трубопроводах охлаждающей воды у холодильника-конденсатора и один из вентиля 24 для стекания дистиллята в мерник.

В змеевик куба через вентиль 7 подают греющий пар, продувают конденсатоотводчик 4. С этого момента ведут наблюдение за температурой смеси в кубе по термометру 13. Момент достижения найденной температуры кипения  $t_{\text{кипо}}$ , т. е. начало кипения смеси, считается началом испытания. От начала испытания через каждые 10 мин производят следующие замеры: температуру кипения смеси в кубе  $t_{\text{кип}}$  по термометру 13; давление

греющего пара  $p_{гр.п.}$ , поступающего в змеевик куба, по манометру 8; количество конденсата греющего пара  $D$  в мернике 2 при закрытом кране 1; температуру конденсата  $\theta_{конд.}$  по термометру 5; давление пара  $p_{п.д.}$ , образующегося при кипении смеси в кубе, по манометру 11; количество образующегося дистиллята  $G_d$  в мерниках 16 при закрытых кранах 18; температуру дистиллята  $t_d$  по термометру 22; расход охлаждающей воды  $U$  в холодильнике-конденсаторе по мернику 26 при закрытом кране 27; температуру охлаждающей воды на входе в холодильник  $t_в^к$  по термометру 15 и на выходе  $t_в^н$  по термометру 20.

Через каждые 10 мин от начала испытания отбирают также пробы из остатка в кубе через кран 17 и из дистиллята через пробный кран 23 и определяют содержание спирта в них, т. е. состав кубового остатка  $x_k$  и состав дистиллята  $x_d$  по спирту.

Испытание продолжают до тех пор, пока состав кубового остатка по спирту не достигнет заданного значения, например  $x_k = 5\%$ . Полученные данные записывают в протокол испытания № 1.

По окончании испытания установку выключают в такой последовательности: прекращают подачу греющего пара в змеевик куба — закрывают вентиль 7; после прекращения стекания дистиллята в мерники прекращают подачу охлаждающей воды в конденсатор-холодильник — закрывают вентиль 14; дистиллят из мерников 16 сливают в общий сборник 28 — открывают краны 18; конденсат и охлаждающую воду сливают из мерников в сливную линию — открывают краны 1 и 27; кубовый остаток сливают в мерник 19 и определяют его количество  $G_k$ .

### Обработка результатов испытания

Для определения количества и состава дистиллята и количества кубового остатка используют уравнение

$$\ln \frac{G_n}{G_k} = \int_{x_k}^{x_n} dx / (y - x), \quad (2.143)$$

где  $G_n$  — количество начальной смеси, кг;  $G_k$  — количество кубового остатка, кг;  $x_n$  и  $x_k$  — массовая доля спирта в начальной смеси и кубовом остатке, %;  $x$  и  $y$  — массовые доли спирта в жидкости и в равновесном паре над этой жидкостью, %.

Аналитически решить уравнение невозможно, так как неизвестна зависимость  $y$  от  $x$ , поэтому применяют графический метод определения интеграла. Для этого на миллиметровой бумаге в определенном масштабе строят график зависимости  $1/(y-x)$  от  $x$  для смеси спирт—вода (рис. 2.38) по приложению 9.

Значение интеграла в пределах от  $x_n = 0,4$  до  $x_k = 0,05$  изображается заштрихованной площадью  $S$  (в  $\text{мм}^2$ ). Тогда

$$\int_{0,05}^{0,4} \frac{dx}{y-x} = SM_S,$$

где  $M_S$  — масштаб площади на графике.

Следовательно, \*

$$\ln G_n/G_k = SM_S.$$

Отсюда находят  $G_n/G_k$ .

Так как по условию известно количество исходной смеси ( $G_n = 80$ ), находят неизвестную величину  $G_k$  — количество кубового остатка (теоретическое).

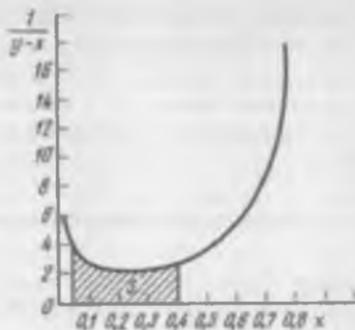


Рис. 238. График зависимости  $\frac{1}{y-x}$  от  $x$

### Протокол № 1

Начальная смесь: этиловый спирт — вода

Количество  $G_n$

Состав  $x_n$

Начальная температура кипения  $t_{\text{кип}}^n$

Кубовый остаток:

количество  $G_k$

состав  $x_k$

Время между замерами $\Delta x$ , мин	Время от начала испарения смеси $\tau$ , мин	Температура кипения смеси $t_{\text{кип}}^n$ , °C	Состав по низкокипящему компоненту			Греющий пар		Конденсат		Дистиллят			Охлаждающая вода		
			начальная смесь $G_n$	дистиллят $G_d$	кубовый остаток $G_k$	абсолютное давление $p_{\text{гр.п.}}$ , Па	температура $t_{\text{гр.п.}}$ , °C	температура $t_{\text{конд.}}$ , °C	количество $D$ , л	абсолютное давление $p_{\text{д.п.}}$ , Па	количество $G_d$ , л	температура $t_d$ , °C	количество $U$ , л	температура, °C	
														начальная $t_{\text{н.п.}}$	конечная $t_{\text{к.п.}}$
			в массовых долях												

$\tau_{\text{общ}}$   $t_{\text{кип}}^n$   $p_{\text{гр.п.}}$   $t_{\text{гр.п.}}$   $t_{\text{конд.}}$   $D_{\text{общ}}$   $p_{\text{д.п.}}$   $G_d^{\text{общ}}$   $t_d$   $U_{\text{общ}}$   $t_{\text{н.п.}}$   $t_{\text{к.п.}}$

При известном составе кубового остатка определяют количество спирта в нем (в кг)

$$G_{\text{сп.к}}^i = G_k^i x_k.$$

Количество дистиллята (в кг)

$$G_d^i = G_n - G_k^i.$$

Количество спирта в дистилляте (в кг)

$$G_{\text{сп.д}}^i = G_{\text{сп.н}} - G_{\text{сп.к}}^i,$$

где  $G_{\text{сп.н}}$  — количество спирта в начальной смеси (в кг).

$$G_{\text{сп.н}} = G_n x_n,$$

$G_{\text{сп.к}}^i$  — рассчитанное (теоретическое) количество спирта в кубовом остатке, кг.

Состав дистиллята по спирту (в %)

$$x_d^i = \frac{G_{\text{сп.д}}^i}{G_d^i} \cdot 100.$$

На основании данных протокола испытания № 2 находят количество спирта в дистилляте

$$G_{\text{сп.д}} = G_d^{\text{общ}} x_d.$$

Результаты аналитического расчета и данные испытания записывают в протокол № 2 и находят расхождение (в %).

#### Протокол № 2

Показатели	Количество кубового остатка	Количество дистиллята	Состав дистиллята	Количество спирта в дистилляте
------------	-----------------------------	-----------------------	-------------------	--------------------------------

Данные аналитического рас-

чета (теоретические)

Данные испытания

Расхождение, %

Расход греющего пара (теоретический) на перегонку определяется из уравнения теплового баланса перегонного куба:

$$D^i i_{\text{гр.п}} + G_n c_n i_{\text{кв.п}} = D^i c_{\text{конд}} \theta_{\text{конд}} + G_k c_k i_{\text{кв.к}} + G_d i_{\text{п.д}}, \quad (2.144)$$

откуда

$$D^i = \frac{G_k c_k i_{\text{кв.к}} - G_n c_n i_{\text{кв.п}} + G_d i_{\text{п.д}}}{i_{\text{гр.п}} - c_{\text{конд}} \theta_{\text{конд}}}$$

где  $G_n$ ,  $G_k$ ,  $G_d$  — количество начальной смеси, кубового остатка и дистиллята, л (из протокола № 1);  $c_n$  и  $c_k$  — удельная теплоемкость соответственно начальной смеси и кубового остатка, Дж/(кг·К).

$$c = c_1 x + c_2 (1 - x), \quad (2.145)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  — удельная теплоемкость компонентов смеси, Дж/(кг·К);  $x$  — массовая доля низкокипящего компонента смеси, %;  $c_{\text{конд}}$  — удельная теплоемкость конденсата, Дж/(кг·К) (определяют по приложению 2 по средней температуре конденсата);  $t_{\text{нач}}$  и  $t_{\text{кон}}$  — температура кипения смеси в кубе в начале и конце испытания (из протокола № 1), °С;  $i_{\text{гр.п}}$  — удельная энтальпия греющего пара, Дж/кг (определяют по приложению 1 по среднему давлению греющего пара р: из протокола № 1);  $i_{\text{пл}}$  — удельная энтальпия пара, поступающего из куба в конденсатор-холодильник, Дж/кг;  $\theta_{\text{конд}}$  — средняя температура конденсата греющего пара, °С.

После расчета теоретического расхода греющего пара находят расхождение (в %) с данными испытания (за счет потерь теплоты в окружающую среду).

#### Вопросы для самопроверки

1. На чем основан процесс перегонки?
2. В чем сущность и назначение процесса перегонки?
3. Что называют дистиллятом и кубовым остатком?
4. Между какими величинами дается зависимость на кривой равновесия?
5. Между какими величинами дается зависимость на диаграмме температур?
6. Как по диаграмме температур поясняется основной принцип перегонки?
7. В чем сущность процесса простой перегонки?
8. В чем заключается недостаток процесса простой перегонки?
9. В каких случаях целесообразно применять простую перегонку?

#### Работа № 13. ИСПЫТАНИЕ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ

Ректификация применяется для наиболее полного разделения летучих бинарных или многокомпонентных смесей. Разделение жидкой смеси на компоненты обусловлено тем, что состав пара  $y_n$ , образующегося над жидкостью, например состав  $x_n$ , отличается от состава этой смеси в условиях равновесного состояния фаз  $y > x$  (рис. 2.39).

В ректификационных аппаратах многократно повторяется простая перегонка, сопровождающаяся одновременным испарением и конденсацией паров. При этом паровая фаза, многократно взаимодействуя с жидкой, обогащается компонентами (или компонентом) смеси, концентрация которых в паровой фазе превышает ее в жидкой фазе при равновесном состоянии. В то же время жидкая фаза обогащается труднолетучими (или высококипящими) и обедняется легколетучими (или низкокипящими — НК) компонентами. Однократный контакт фаз, завершающийся достижением фазового равновесия, называется ступенью изменения концентрации, или теоретической тарелкой.

Ректификационная колонна, назначение которой заключается в том, чтобы привести в тесный контакт жидкую и паровую фазы, снабжена разнообразными контактными устройствами: тарелка-

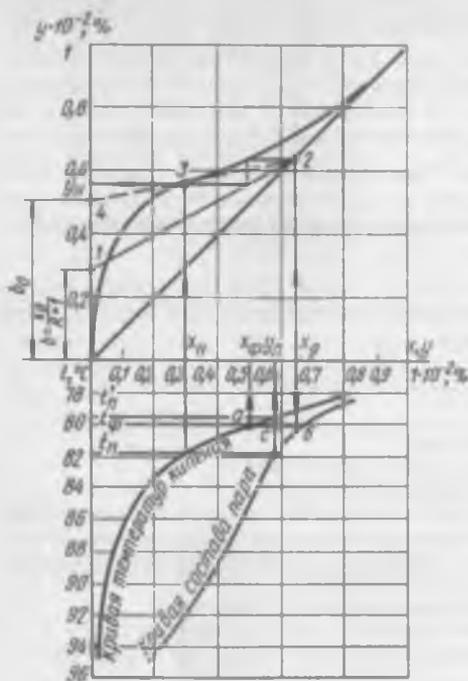


Рис. 2.39. Диаграмма  $x-y$  для определения теоретического числа тарелок и величины  $b_0$  для расчета минимального флегмового числа

ми разных типов, насадками и т. п. Тарелочная колонна имеет определенное число перфорированных или колпачковых тарелок, каждая из которых играет ту же роль, что и куб при простой перегонке. Пар, полученный в кубе-кипятильнике, поднимается вверх и проходит через отверстия в первой тарелке, соприкасается с находящейся на ней жидкостью и конденсируется. Так как  $y > x$ , конденсат пара будет более богат легколетучими компонентами.

За счет теплоты конденсации пара жидкость образует новый пар, более богатый низкокипящими компонентами, который поднимается на следующую тарелку, где конденсируется и т. д. Избыток жидкости на каждой тарелке стекает на нижележащую тарелку (контактный элемент). В насадочных колоннах взаимодействие между жидкостью и паром происходит на поверхности насадки (твердые инертные тела).

Таким образом, во всей колонне протекает массообмен между жидкостью и паром при их противотоке. Чтобы создать непрерывный ток жидкой фазы, колонну орошают жидкостью, полученной в результате конденсации паров с верхней тарелки в теплообменнике-дефлегматоре. Эту жидкость, а также перетекающую с верхних контактных элементов на нижние, называют флегмой.

Для определения эффективности работы колонны — ее разделительной (укрепляющей) способности — необходимо определить число ступеней изменения концентрации, т. е. число теоретических тарелок (ЧТТ).

Следует учитывать, что взаимодействие фаз на контактных устройствах происходит за время, которое значительно меньше времени установления равновесия в системе жидкость — пар.

Следовательно, на ступенях контакта фазовое равновесие не достигается. Степень отклонения системы от равновесия является движущей силой процесса, выражаемой как разность равновесных и рабочих концентраций компонентов в паровой и жидкой фазах. Число теоретических тарелок можно определить совместным решением уравнения рабочей линии и линии равновесия, причем чаще всего для этой цели применяют графический метод, используя диаграмму  $x-y$  ( $x$  и  $y$  — состав соответственно жидкой и паровой фаз по легколетучему компоненту, см. рис. 2.39, верхняя часть).

Кривую равновесия строят по справочным данным. Рабочая линия 1—2, характеризующая зависимость между составом пара и жидкости по НК для любого сечения колонны между ее тарелками, для колонны периодического действия и укрепляющей части колонны непрерывного действия описывается следующим выражением:

$$y = \frac{x_d}{R+1} + \frac{R}{R+1}x, \quad (2.146)$$

где  $x_d$  — состав дистиллята НК, %;  $R$  — флегмовое число колонны, которое показывает, в каком отношении делится пар, поступающий в дефлегматор, на флегму  $G_\phi$  и дистиллят  $G_d$ .

$$R = G_\phi / G_d. \quad (2.147)$$

Для построения рабочей линии нужно рассчитать величину отрезка  $\frac{x_d}{R+1} = b$  и отложить это значение на оси  $y$  (точка 1); вторую точку 2 получают при восстановлении перпендикуляра от оси абсцисс, от состава  $x_d$ , до пересечения с диагональю диаграммы.

Число теоретических тарелок (ЧТТ), необходимых для повышения концентрации по НК в интервале от  $x_n$  (состав начальной смеси) до  $x_d$ , находят как число ступенек между рабочей и равновесной линиями, причем построение начинают от точки 2.

Теоретическая тарелка является эталоном, с которым сравнивают реальную тарелку колонны. Эффективность ректификационной колонны может быть оценена средним коэффициентом полезного действия  $\eta$  тарелки, который равен отношению числа реальных  $n_d$  и теоретических  $n_t$  тарелок:

$$\eta = n_d / n_t. \quad (2.148)$$

В насадочных колоннах эффективность оценивают величиной ВЭТС — высота насадки, эквивалентная теоретической ступени изменения концентрации:

$$\text{ВЭТС} = H_{\text{кол}} / n_t, \quad (2.149)$$

где  $H_{\text{кол}}$  — высота колонны, м.

Очевидно, что ЧТТ зависит от положения рабочей линии, которое, в свою очередь, зависит от значения флегмового числа. Так, при уменьшении флегмового числа угол наклона рабочей линии уменьшается и при некотором его значении рабочая линия пересекает линию равновесия в точке 3, соответствующей концентрации начальной смеси  $x_n$ . Это положение рабочей линии (2—3—4) является предельным, и число тарелок, необходимых для ректификации смеси от  $x_n$  до  $x_d$ , равно бесконечности. Измерив отрезок  $b_0$  (см. рис. 2.39), можно определить минимальное флегмовое число  $R_{\min}$ , так как

$$b_0 = x_d / (R_{\min} + 1),$$

следовательно,

$$R_{\min} = (x_d - b_0) / b_0. \quad (2.150)$$

Отношение рабочего флегмового и минимального чисел называется коэффициентом избытка флегмы  $\beta$ :

$$\beta = R / R_{\min}. \quad (2.151)$$

В установках периодического действия концентрация спирта в кубе-испарителе со временем уменьшается. Чтобы получать дистиллят постоянной концентрации, необходимо непрерывно увеличивать флегмовое число.

Значение флегмового числа влияет также на расход теплоты (пара) в кубе и расход воды на дефлегмацию.

При паровом обогреве куба расход пара на ректификацию находят из уравнения теплового баланса колонны:

$$Di'' + G_n c_n t_n + R G_d c_\phi t_\phi = G_d i_d (R + 1) + G_k c_k t_k + Di' + Q_{\text{пот}}, \quad (2.152)$$

откуда количество греющего пара (в кг)

$$D = \frac{R G_d (i_d - c_\phi t_\phi) + G_k c_k t_k - G_d i_d + Q_{\text{пот}}}{i'' - i'}. \quad (2.153)$$

Расход воды определяют из теплового баланса дефлегматора:

$$(G_d + R G_d) i_d + G_n c_n t_n'' = R G_d c_\phi t_\phi + G_d i_d + G_n c_n t_n'' + Q_{\text{пот}},$$

откуда

$$G_n = \frac{R G_d (i_d - c_\phi t_\phi) - Q_{\text{пот}}}{c_d (t_n'' - t_d)}. \quad (2.154)$$

в формулах  $G_n$ ,  $G_d$ ,  $G_k$ ,  $G_\phi$  — количество соответственно начальной смеси, дистиллята, кубового остатка и охлаждающей воды, кг;  $i''$  и  $i'$  — удельная энтальпия греющего пара и его конденсата, кДж/кг;  $c_n$ ,  $c_\phi$ ,  $c_k$ ,  $c_d$  — удельная теплоемкость соответственно начальной смеси, флегмы, кубового остатка и охлаждающей

воды, кДж/(кг·К);  $t_n, t_f, t_k, t_n'', t_n'''$  — соответственно температура начальной смеси, флегмы, кубового остатка, начальная и конечная температура воды, охлаждающей дефлегматор, °С;  $i_d$  — удельная энтальпия пара, поступающего с верхней тарелки в дефлегматор с концентрацией  $y_n$ , кДж/кг (если принять  $y_n \approx x_n$ , тогда  $i_n \cong i_d$  — энтальпии паров дистиллята);  $Q_{пот}$  — потери теплоты в окружающую среду, кДж ( $Q_{пот}$  можно принять в размере 5—10 % полезно использованной теплоты).

Если при испытании колонны не удастся измерить количество и концентрацию кубового остатка (или дистиллята), то для их нахождения можно воспользоваться уравнениями материального баланса:

по всем компонентам

$$G_n = G_d + G_k, \quad (2.155)$$

по легколетучему компоненту

$$\frac{G_n x_n}{100} = \frac{G_d x_d}{100} + \frac{G_k x_k}{100}, \quad (2.156)$$

Составляющие  $G_n, G_d, G_k$  выражают объемные, массовые или молярные количества; в соответствии с этим концентрация спирта бывает объемной, массовой и молярной. С помощью спиртомера измеряют объемную концентрацию. Для перевода объемной концентрации в массовую можно воспользоваться приложением 9, а для перевода массовой концентрации в молярную — следующей зависимостью:

$$x_{мол} = \frac{x_{мас}/M_{сп}}{x_{мас}/M_{сп} + (100 - x_{мас})/M_в} \cdot 100, \quad (2.157)$$

где  $M_{сп}$  и  $M_в$  — молярные массы соответственно спирта и воды ( $M_{сп} = 46,07$ ;  $M_в = 18,02$  кг/кмоль).

Одним из важных технико-экономических показателей работы колонны является удельный расход греющего пара (в кг/кг безводного спирта)

$$d = D/G_{д.бевз}, \quad (2.158)$$

где  $G_{д.бевз}$  — количество безводного спирта, кг.

$$G_{д.бевз} = G_d x_d / 100. \quad (2.159)$$

## Цель работы

1. Изучение процесса ректификации в колонне периодического действия.
2. Определение рабочего флегмового числа колонны.

3. Определение минимального флегмового числа и коэффициента избытка флегмы.
4. Расчет ВЭТС.
5. Определение расхода воды на дефлегмацию (практически и расчетом).
6. Определение удельного расхода греющего пара.

### Описание экспериментальной установки

Работа выполняется на полупроизводственной установке (рис. 2.40).

Ректификационная колонна 8 насадочного типа, покрытая слоем изоляции, размещена над кубом-кипятильником 3, заключенным в камеру 4, в которую подается греющий пар; давление пара контролируется манометром 7, количество — мерником 2.

Подлежащую разделению начальную смесь заливают в куб-кипятильник через воронку 16, а сливают через вентиль 23; температуру смеси определяют по термометру 5.

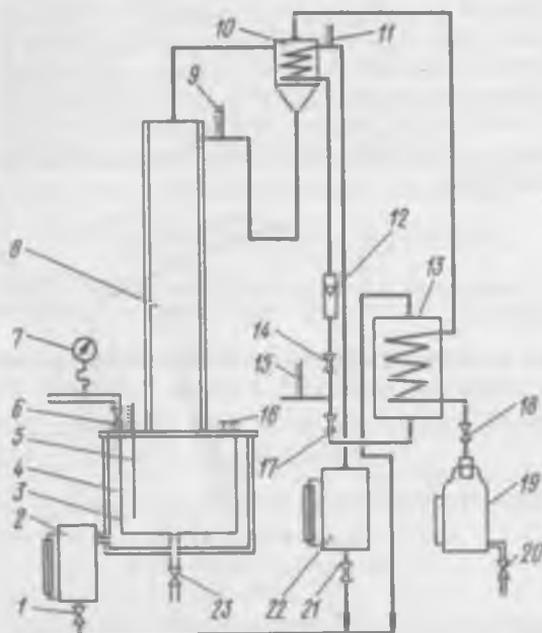


Рис. 2.40. Схема ректификационной установки:

1, 6, 14, 17, 18, 20, 21, 23 — вентили; 2, 22 — мерники; 3 — куб-кипятильник; 4 — нагревательная камера; 5, 9, 11, 15 — термометры; 7 — манометр; 8 — ректификационная колонна; 10 — дефлегматор; 12 — расходомер; 13 — конденсатор-холодильник; 16 — воронка; 19 — емкость

Водно-спиртовые пары из ректификационной колонны поступают в дефлегматор 10, где часть их конденсируется охлаждающей водой, проходящей по змеевику, и возвращается в качестве флегмы в верхнюю часть колонны с температурой, определяемой по термометру 9. Температура воды на входе и выходе из дефлегматора измеряется по термометрам 15 и 11, а ее расход—расходомером 12 или определяется по мернику 22 и секундомеру.

Часть несконденсировавшихся в дефлегматоре паров отводится в конденсатор-холодильник 13, где они конденсируются, и конденсат охлаждается водой, которая подается в конденсатор при открытии вентиля 17. Дистиллят-продукт собирается в емкость 19. Вентиль 20 служит для отбора проб дистиллята.

### Методика проведения испытания

В куб-кипятильник установки заливают исходную смесь (этиловый спирт—вода) в количестве 5—10 л. Предварительно измеряют объемную концентрацию этой смеси  $x_n$ , которая должна быть в пределах 65—75 %. Концентрацию спирта в спиртосодержащей жидкости определяют с помощью стеклянного спиртомера, для чего отбирают пробу в мерный цилиндр в количестве 200 мл. Показание спиртомера при данной температуре пересчитывают по соответствующим таблицам на концентрацию при температуре 20 °С.

В дефлегматор вода поступает при открытии вентиля 14, а в конденсатор-холодильник через вентиль 17.

Греющий пар пускают, открывая вентиль 6, поддерживая давление его по манометру не выше 101 кПа.

Открывают вентиль 18 и после появления первых капель дистиллята в емкости 19 регулируют подачу воды в дефлегматор, чтобы на выходе ее температура была 40—55 °С, и добиваются равномерного потока дистиллята, охлажденного до комнатной температуры.

Замечают время начала испытания. Закрывают вентили 1 и 21. С этого момента в течение 10—15 мин через каждые 3 мин делают замеры по протоколу.

После окончания испытания прекращают подачу греющего пара, суммируют количество греющего пара, израсходованного на процесс, количество воды, охлаждающей дефлегматор, а также количество дистиллята, а затем, отобрав пробу из сборника дистиллята (из вентиля 20), определяют ее объемную концентрацию  $x_d$  в процентах. Рассчитывают средние значения остальных параметров (кроме  $t_n$  и  $t_n$ ).

Примечание. Подачу воды в дефлегматор прекращают только после того, как колонна остынет.

### Протокол испытания

Количество исходной смеси  $G_n$ , л

Объемная концентрация спирта в исходной смеси  $x_n$ , %

Параметр	Номер испытания				
	1	2	3	...	n

Время от начала испытания  $\tau$ , мин

Количество греющего пара  $D$  по мернику 2, л

Количество воды  $G_a$  по мернику 22, л

Давление греющего пара  $p_{гр}$  по манометру 7, кПа

Температура воды, поступающей в дефлегматор,  $t''_a$  по термометру 15, °C

Температура воды, уходящей из дефлегматора,  $t'_a$  по термометру 11, °C

Температура флегмы  $t_f$  по термометру 9, °C

Количество дистиллята  $G_d$  в емкости 19, л

Температура кипящей смеси в кубе  $t_n$  по термометру 5, °C

Объемная доля спирта в дистилляте  $x_d$ , %

$t_n$

### Обработка результатов испытания

Для обработки данных испытания используют блок-схему алгоритма расчета (рис. 2.41). Предварительно величины  $G_n$  и  $G_d$ , измеренные в литрах, выражают в килограммах. Для этого следует воспользоваться значениями плотностей  $\rho_n$  и  $\rho_d$ , найденных при соответствующих концентрациях  $x_n$  и  $x_d$  из приложения 9. По тому же приложению нужно перевести значения этих концентраций из объемных в массовые проценты.

Далее строят по приложению 10 совмещенную  $x-y$ - и  $t-x, y$ -диаграмму на миллиметровой бумаге в достаточно большом масштабе. Остальные величины блока ввода исходных данных берут из протокола испытаний или находят следующим образом:  $i_d$  — из приложения 8 в зависимости от массовой концентрации дистиллята;  $i''$  и  $i'$  — из приложения 1 по давлению греющего пара  $p$ ;  $c_n, c_k, c_\phi$  — из приложения 11 в зависимости от концентраций  $x_n, x_k, x_\phi$  при соответствующей температуре.

Концентрацию флегмы и ее температуру можно определить с помощью  $t-x, y$ -диаграммы (см. рис. 2.39, нижняя часть): если из точки на оси  $x$ , соответствующей составу дистиллята  $x_d$ , восстановить перпендикуляр до кривой состава пара (точка б) и переместиться на кривую кипения (точка а), то концентрация флегмы  $x_\phi$  определяется на оси  $x$ , а температура конденсации находится на оси температур  $t_\phi$ . При известном флегмовом числе  $R$  может быть определен (или уточнен) состав пара  $y_n$ , поступающего в дефлегматор. Для этого отрезок  $ab$  необходимо раз-

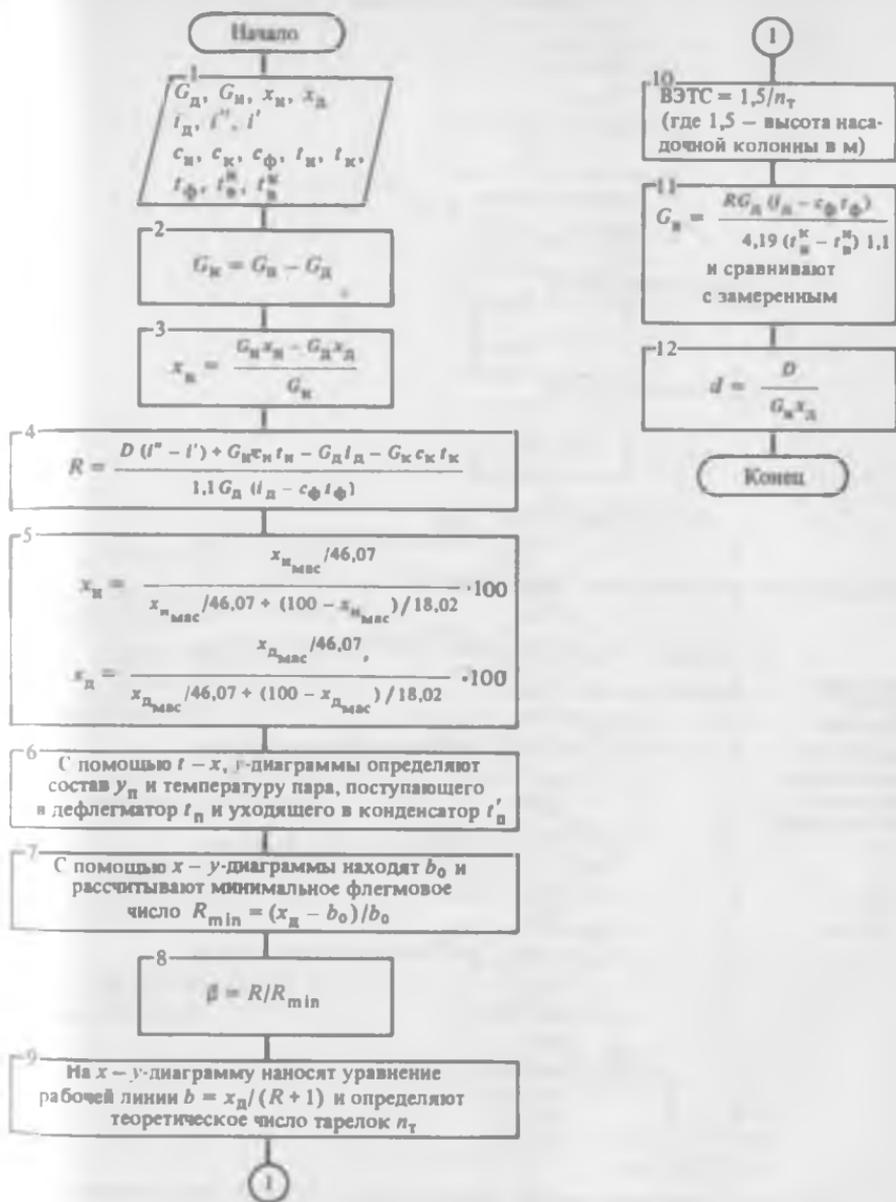


Рис. 2.41. Блок-схема алгоритма расчета ректификационной колонны

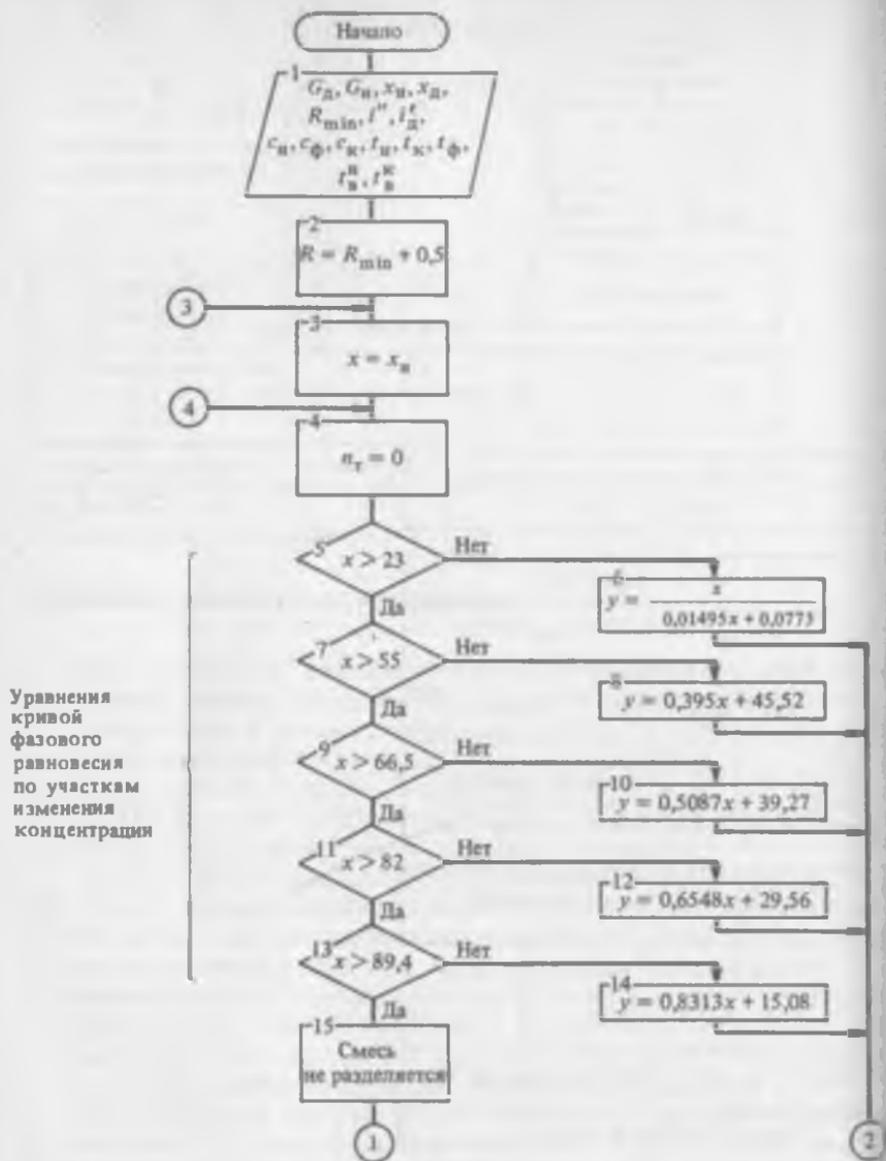
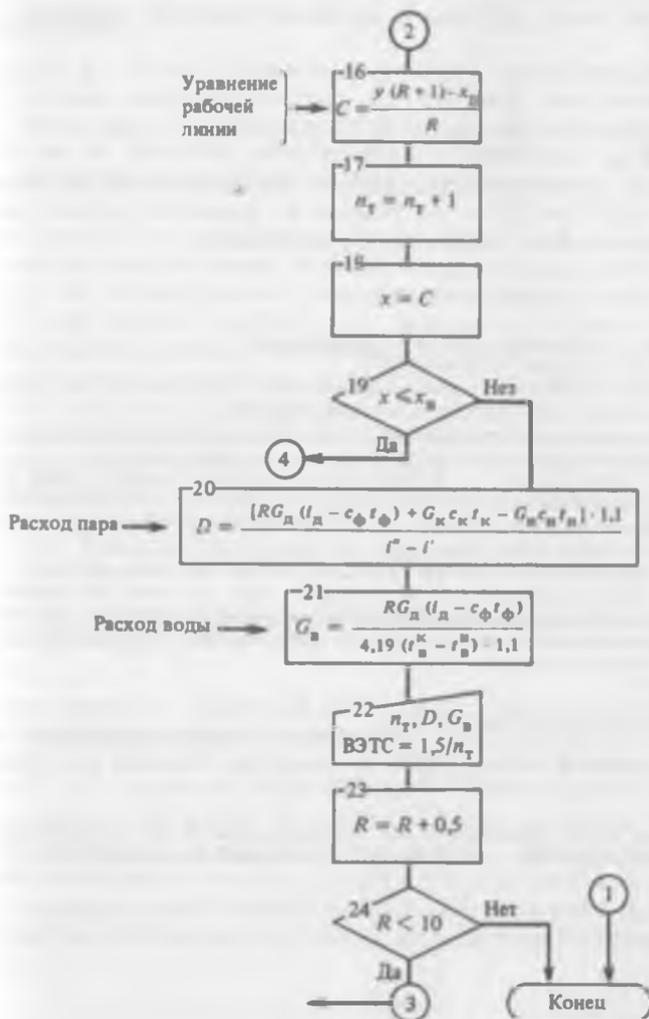


Рис. 2.42. Блок-схема расчета теоретического числа тарелок расхода пара



и расхода воды

делить в отношении  $vc/ca = R$  и из точки  $c$  подняться на ось  $xу$ . Температуру поступающего в дефлегматор пара  $t_n$  и пара, уходящего в конденсатор  $t'_n$ , находят на оси температур. Следует отметить, что при высоких концентрациях НК в дистилляте (более 85 %) состав пара, флегмы и дистиллята можно принять одинаковым.

При исследовании влияния флегмового числа на теоретическое число тарелок (или ВЭТС), расход греющего пара и расход воды на дефлегмацию расчеты производят по блок-схеме, представленной на рис. 2.42.

Затем на одном рисунке строят графики  $n_r = f(R)$ ;  $D = f(R)$ ;  $G_w = f(R)$ ; ВЭТС =  $f(R)$  и на основе их анализа делают вывод о влиянии флегмового числа на эти величины.

#### Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается принцип ректификации?
2. Для чего служит дефлегматор?
3. Какие массообменные процессы происходят на тарелках (или других массообменных устройствах) ректификационной колонны?
4. Как характеризуется эффективность процесса разделения смеси?
5. Что такое флегмовое число колонны, как оно определяется?
6. Как изменится на  $x - y$ -диаграмме положение рабочей линии колонны, если при неизменной концентрации дистиллята увеличить флегмовое число?
7. На значение каких величин влияет флегмовое число?
8. Как изменить флегмовое число на испытуемой установке?
9. Что такое минимальное флегмовое число? Как оно определяется?
10. Что такое удельный расход греющего пара, от чего он зависит?
11. Как определяется расход воды в дефлегматор (расчетом и практически)?
12. Каким методом можно рассчитать теоретическое число тарелок колонны? Поясните с помощью рисунка.

#### Список рекомендуемой литературы

Государственный комитет СССР по стандартам. Таблицы для определения содержания этилового спирта в водно-спиртовых растворах. — М.: Стандарты, 1979. — 366 с.

Стабников В. Н., Николаев А. П., Мандельштейн М. Л. Ректификация в пищевой промышленности. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. — 232 с.

## ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

### Работа № 14. ИЗУЧЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОКОЯ ЖИДКОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ СОСУДЕ

При длительном равномерном вращении сосуда с жидкостью устанавливается состояние относительного покоя, когда частицы жидкости не перемещаются относительно одна другой, а также относительно самого сосуда, т. е. жидкость и сосуд движутся как одно целое. Законы относительного покоя используются при расчетах разных аппаратов, применяемых в пищевой промышленности (центрифуг, сепараторов, мешалок и т. д.), на прочность и для выбора параметров технологического процесса.

Распределение давления и жидкости получают интегрированием для конкретной системы обобщенного дифференциального уравнения равновесия Эйлера

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz), \quad (3.1)$$

где  $X, Y, Z$  — проекции единичных (отнесенных к единице массы) массовых сил на соответствующие оси,  $m^2/c$ ;  $dx, dy, dz$  — проекции приращения координат точек,  $m$ .

Геометрическое уравнение поверхности равного давления получают интегрированием уравнения

$$Xdx + Ydy + Zdz = 0. \quad (3.2)$$

В системе, состоящей из цилиндрического сосуда, заполненного жидкостью и вращающегося вокруг вертикальной оси с угловой скоростью  $\omega = \text{const}$ , на каждую частицу жидкости действуют массовые силы: сила тяжести и центробежная сила.

Проекции единичных массовых сил на соответствующие оси будут равны (рис. 3.1):

$$X = \omega^2 r \cos \alpha = \omega^2 x; \quad Y = \omega^2 r \sin \alpha = \omega^2 y; \quad Z = -g.$$

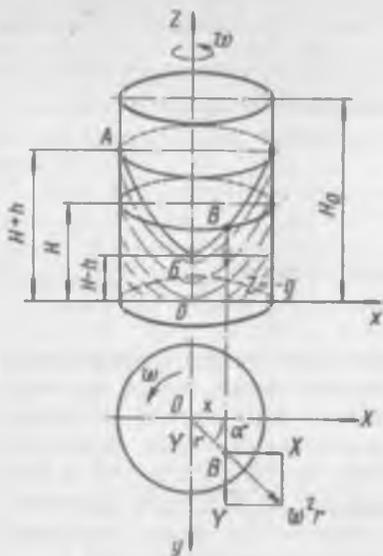
Уравнение (3.2) примет вид:

$$\omega^2 x dx + \omega^2 y dy - g dz = 0.$$

После интегрирования получим

$$(\omega^2/2)(x^2 + y^2) - gz = c,$$

Рис. 3.1. К выводу расчетных соотношений лабораторной работы № 14



или

$$(\omega^2/2)r^2 - gz = c, \quad (3.3)$$

где  $x^2 + y^2 = r^2$ ;  $c$  — постоянная интегрирования.

Уравнение (3.3) описывает семейство параболоидов вращения. Из него видно, что параметры параболоида вращения не зависят от свойств жидкости, налитой в сосуд.

Точки  $A$  и  $B$  принадлежат свободной поверхности, для которой давление  $p_0 = \text{const}$ . Так как объем параболоида равен половине объема цилиндра при тех же радиусе и высоте, то

уровень  $H$  делит высоту параболоида пополам. Выбранные точки будут иметь координаты  $A(R, H+h)$  и  $B(0, H-h)$ , где  $h$  — половина высоты параболоида. Их координаты должны удовлетворять уравнению (3.3):

$$(\omega^2/2)r^2 - gz = (\omega^2/2)R^2 - g(H+h)$$

и

$$(\omega^2/2)r^2 - gz = -g(H-h).$$

Тогда

$$(\omega^2/2)(R^2 - r^2) - g[(H+h) - z] = 0 \quad (\text{точка } A),$$

$$(\omega^2/2)r^2 - g[z - (H-h)] = 0 \quad (\text{точка } B).$$

Решая совместно последние уравнения, получим возможность рассчитать величину  $h$  и, следовательно, постоянную интегрирования  $c$ :

$$h = (\omega^2/4g)R^2; \quad c = (\omega^2/4)R^2 - gH.$$

Уравнение свободной поверхности получит следующее выражение:

$$(\omega^2/2)(r^2 - R^2/2) - g(z - H) = 0. \quad (3.4)$$

Если известны координаты точки  $B(r = R_B; z = z_B)$ , то из уравнения свободной поверхности (3.4) можно определить угловую скорость  $\omega$ :

$$\omega = \sqrt{2g \frac{z_B - H}{R_B^2 - R^2/2}} \quad (3.5)$$

Если постоянную интегрирования для уравнения (3.3) определить по координатам точки  $B(R_B, z_B)$ , лежащей на свободной поверхности, то из уравнения свободной поверхности исчезнет зависимость  $c$  от первоначального заполнения сосуда  $H$ :

$$c = (\omega^2/2)R_B^2 - gz_B, \quad (3.6)$$

$$(\omega^2/2)(r^2 - R_B^2) - g(z - z_B) = 0. \quad (3.7)$$

Для определения угловой скорости по уравнению (3.7) надо измерить координаты еще одной какой-либо точки  $B'$ , лежащей на свободной поверхности, например  $B'(r = R_{B'}, z = z_{B'})$  и подставить их в уравнение (3.7).

### Цель работы

1. Получение зависимости координат точек, лежащих на свободной поверхности, от заданной угловой скорости интегрированием дифференциального уравнения Эйлера.

2. Экспериментальное определение координат точек, лежащих на свободной поверхности при заданной угловой скорости.

3. Определение доверительной ошибки измерения угловой скорости при вероятности  $P=0,95$  на основе опытов при разных угловых скоростях.

### Описание экспериментальной установки

Установка для изучения относительного покоя жидкости во вращающемся сосуде (рис. 3.2) состоит из прозрачного цилиндрического сосуда  $1$ , в который наливается вода на высоту  $H$ . Сосуд закреплен в обойме  $2$ . Вращение сосуда обеспечивается электродвигателем  $3$  постоянного тока или гидроприводом с изменяющей-

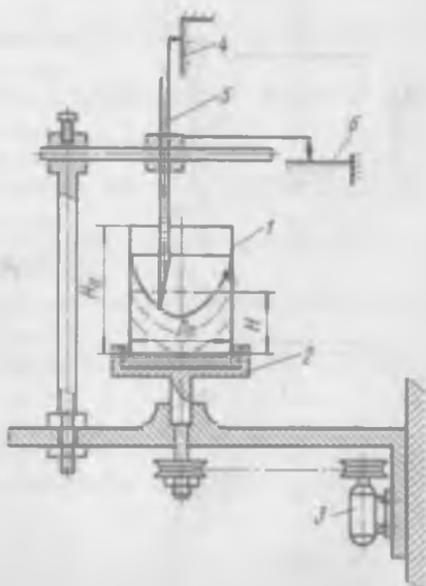


Рис. 3.2. Схема установки для изучения относительного покоя жидкости во вращающемся сосуде:

1 — сосуд; 2 — обойма; 3 — электродвигатель; 4 — шкала ординат; 5 — мерная игла; 6 — шкала абсцисс

ся частотой вращения. Измерение координат точек, лежащих на свободной поверхности, производится с помощью мерной иглы 5, которую можно перемещать в вертикальном и горизонтальном направлениях. Нулевое деление шкалы абсцисс  $b$  соответствует положению мерной иглы на оси вращения сосуда, а шкалы ординат  $4$  — плоскости дна сосуда.

Угловую скорость определяют с помощью тахометра или визуально по секундомеру и метке, нанесенной на наружную поверхность вращающегося сосуда.

### Методика проведения испытания

В сосуд наливают воду до метки  $H = (0,25 - 0,5)H_0$ . Включают электродвигатель 3 и после достижения системой равновесия измеряют частоту вращения  $n_u = n_1$  и координаты семи ( $k = 1, \dots, m, m = 7$ ) точек  $B_{k1}$ , равноотстоящих в радиальном направлении одна от другой, при помощи мерной иглы 5.

Аналогичные замеры проводят при двух других значениях частоты вращения сосуда  $n_u$  ( $u = 1, \dots, N, N = 3$ ). Заполняют протокол испытания и осуществляют необходимые расчеты.

### Протокол испытания

Высота сосуда  $H_0$ , радиус сосуда  $R_0 = D_0/2$ , высота заполнения сосуда  $H$

$m$	Обозначение точки измерения $B_{k1}$	$z_{B_{k1}}$ , мм	$R_{B_{k1}}$ , мм	$n_{B_{k1}}$ , мин <sup>-1</sup>	$\omega_{B_{k1}}$ , с <sup>-1</sup>	$\omega_u$ , с <sup>-1</sup>	$\omega_{\text{м(таз)}}$ (по тахометру), с <sup>-1</sup>	$\omega_{B_{k1}}$ , с <sup>-1</sup>	$S^2(\omega_{B_{k1}})$ , с <sup>-2</sup>
1	$B_{11}$	+							
		+							
		+							
		+							
		+							
		+							
		+							
2	$B_{71}$								
	$B_{12}$								
3	$B_{72}$								
	$B_{13}$								

Примечание. В протокол испытаний заносит результаты трех опытов — координаты семи точек в каждом опыте.

## Обработка результатов испытания

Полученные координаты семи точек свободной поверхности при трех значениях частоты вращения позволяют в полной мере провести статистический анализ результатов измерения угловой скорости (исключение грубых ошибок, определение доверительных ошибок среднего и единичного результатов измерения).

Приведенная блок-схема алгоритма расчета (рис. 3.3) доверительных ошибок  $\varepsilon(\omega)$  и  $\varepsilon(\omega_k)$  может быть использована и для составления программы расчета на ЭВМ.

Блок 1. Исходными данными являются: данные протокола испытания;  $k$  — номера точек на свободной поверхности при  $\omega_u = \text{const}$ ;  $m = 7$  — число точек;  $u$  — номер опыта;  $N = 3$  — число опытов, различающихся по частоте вращения;  $u = 1, \dots, N$ ;  $k = 1, \dots, m$ .

Блок 2. Присвоение индексам начального значения  $k = 1$ ,  $u = 1$ .

Блок 3. Расчет угловой скорости  $\omega_{ku}$ .

Блок 4. Присвоение  $k = k + 1$  (расчеты для других точек).

Блок 5. Блок сравнения.

Блок 6. Определение среднего значения угловой скорости  $\omega_u$ .

Блок 7. Определение абсолютного отклонения  $\Delta\omega_{ku}$ .

Блок 8. Расчет оценки дисперсии единичного результата  $S^2(\omega_{ku})$ .

Блок 9. Исключение грубых ошибок [см. модуль  $r_k \geq r_{\max}$  (см. рис. 1.3)].

Блок 10. Расчет чисел степеней свободы  $f_u$  оценок дисперсии  $S^2(\omega_{ku})$ .

Блок 11. Присвоение  $u = u + 1$  (повторение расчета при других угловых скоростях).

Блок 12. Блок сравнения.

Блок 13. Проверка однородности оценок дисперсии (см. рис. 1.2).

Блок 14. Расчет средневзвешенной оценки дисперсии при наличии однородности оценок дисперсии.

Блок 15. Расчет степеней свободы средневзвешенной оценки дисперсии.

Блок 16. Расчет доверительной ошибки единичного результата.

Блок 17. Присвоение  $u = 1$ .

Блок 18. Определение доверительной ошибки средней величины угловой скорости с использованием критерия Стьюдента (см. рис. 1.4).

Блок 19. Присвоение  $u = u + 1$ .

Блок 20. Блок сравнения.

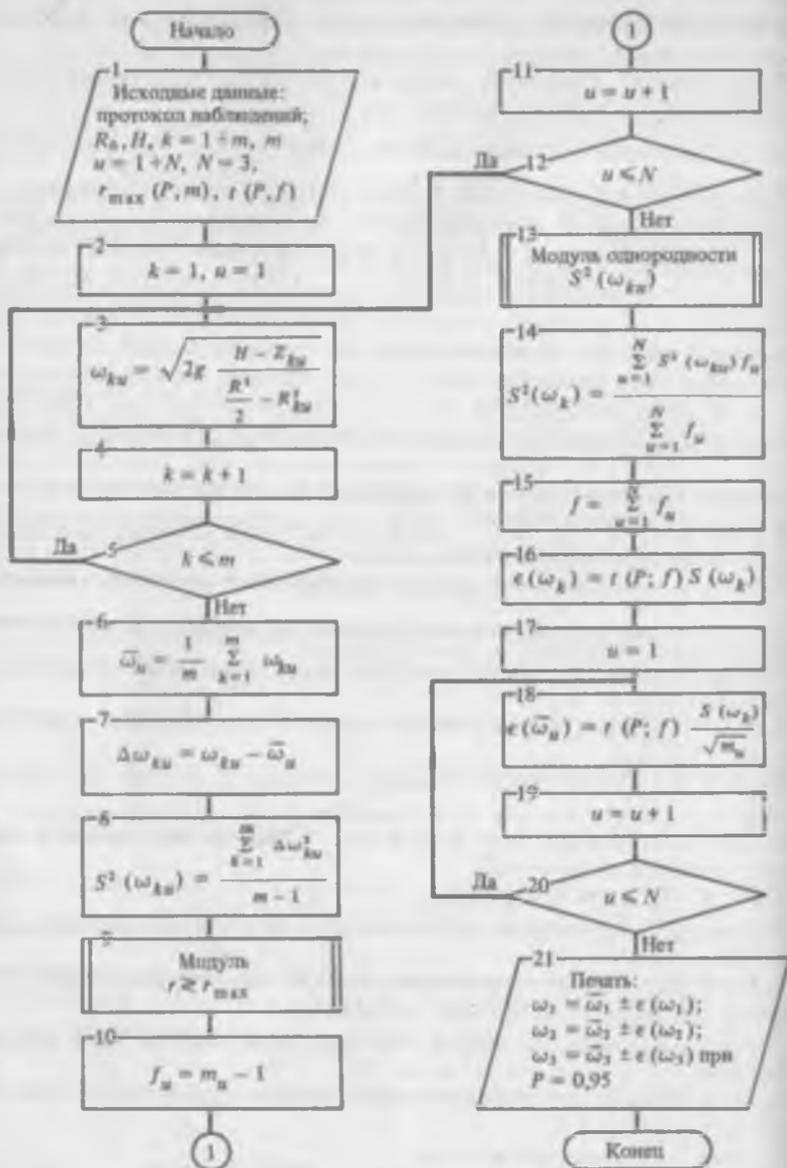


Рис. 3.3. Блок-схема алгоритма обработки экспериментальных данных

**Блок 21.** Печать — доверительные интервалы для трех измеренных угловых скоростей вращения.

В протоколе испытания записан результат измерения угловой скорости с помощью тахометра

$$\omega_{и(тах)} = \text{пл}_{тах} / 30. \quad (3.8)$$

В отчете по лабораторной работе следует отметить, попадают ли величины  $\omega_{и(тах)}$  в доверительные интервалы  $\omega_{и} = \omega_{и} \pm \varepsilon$  ( $\omega_{и}$ ) и  $\omega_{и} = \omega_{и} \pm \varepsilon$  ( $\omega_{и}$ ), найденные с вероятностью  $P = 0,95$ , а также пояснить полученный результат с учетом класса точности тахометра.

#### Вопросы для самопроверки

1. Каково выражение для проекций единичных массовых сил при равнопеременном прямолинейном движении сосуда с жидкостью, при неподвижном сосуде?
2. Зависят ли параметры свободной поверхности жидкости во вращающемся сосуде от плотности жидкости?
3. Каково распределение давления жидкости на дно вращающегося сосуда? На цилиндрическую вертикальную стенку?
4. Как изменится уравнение свободной поверхности вращающейся вместе с сосудом жидкости в условиях невесомости?
5. Будет ли в условиях невесомости испытывать давление дно вращающегося с жидкостью сосуда, стенки сосуда?
6. Будет ли зависеть давление во вращающемся сосуде от плотности жидкости в условиях невесомости, в земных условиях?
7. Какие причины заставляют жидкость вращаться вместе с сосудом, отставать при вращении от сосуда?
8. Как будет вести себя во вращающемся сосуде идеальная жидкость?

#### Список рекомендуемой литературы

- Вильнер Я. М., Ковалев Я. Т., Некрасов Б. Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. — Минск: Высшая школа, 1976. — 414 с.
- Гидравлика, гидромшины и гидроприводы/Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. — М.: Машиностроение, 1982. — 422 с.
- Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами РД 50213—80. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 319 с.
- Расчеты и задачи по процессам и аппаратам пищевых производств/С. М. Гребенюк, Н. С. Михеева, Ю. П. Грачев и др. — М.: Агропромиздат, 1987. — 304 с.
- Справочник по гидравлике/В. А. Большаков, Ю. М. Константинов, В. Н. Попов и др. — Киев: Вища школа, 1977. — 279 с.
- Справочник по гидравлическим расчетам/Под ред. П. К. Киселева. — 5-е изд. — М.: Энергия, 1974. — 312 с.

#### Работа № 15. ТАРИРОВКА РАСХОДОМЕРА ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Расход вещества — это масса или объем вещества, проходящего через рассматриваемое сечение в единицу времени. Объемный расход вещества измеряется при помощи приборов, назы-

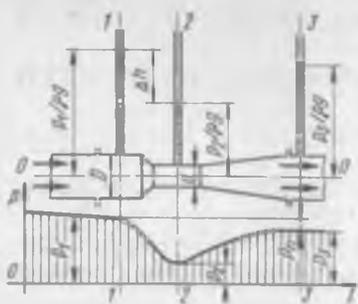


Рис. 3.4. Схема расходомера Вентури и график изменения давления жидкости  $p$ , при прохождении через расходомер

ваемых расходомерами. Расходомеры, применяемые в пищевой промышленности, по принципу действия можно разделить на следующие основные группы: переменного перепада давления, постоянного перепада давления, переменного уровня и др.

Расходомеры переменного перепада давления состоят из стандартного сужающего устройства, приборов для измерения давления (разности давления) и параметров среды, соединительных трубопроводов. В качестве стандартных сужа-

ющих устройств могут быть применены диафрагмы, сопла, сопла Вентури и трубы Вентури.

Методика и порядок расчета и подбора стандартных (нормализованных) сужающих устройств расходомеров определяются утвержденными Государственным комитетом СССР по стандартам Правилами измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами РД 50213—80. Если требования этих Правил выполнены, нормализованное сужающее устройство не нуждается в индивидуальной тарифовке.

Сужающие устройства устанавливают внутри трубопровода, поэтому при прохождении потока жидкости перед сужающим устройством и после него возникает перепад давления. По этому перепаду давлений и определяют расход протекающей жидкости. Зависимость между расходом жидкости и перепадом давления может быть аналитически получена при помощи уравнения Д. Бернулли для сечений 1—1 и 2—2 (рис. 3.4):

$$z_1 + p_1/\rho g + \alpha_1(v_1^2/2g) = z_2 + p_2/\rho g + \alpha_2(v_2^2/2g) + \sum h_n. \quad (3.9)$$

Если принять  $\alpha_{1,2} = 1$ , пренебречь потерями энергии ( $\sum h_n = 0$ ) и сужающее устройство установить горизонтально ( $z_1 = z_2$ ), то

$$p_1/\rho g + v_1^2/2g = p_2/\rho g + v_2^2/2g. \quad (3.10)$$

Применив уравнение неразрывности потока:

$$v_1(\pi D^2/4) = v_2^2(\pi d^2/4), \quad (3.11)$$

определим скорости движения жидкости в трубопроводе

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g(\rho_1 - \rho_2)}{\rho g(D^2/d^4 - 1)}} \quad (3.12)$$

Тогда теоретический расход жидкости

$$V_{\tau} = v_1(\pi D^2/4) = \pi D^2/4 \sqrt{\frac{2g}{(D/d)^4 - 1}} \times \sqrt{\Delta p/\rho g}. \quad (3.13)$$

где выражение

$$\pi D^2/4 \sqrt{\frac{2g}{(D/d)^4 - 1}} = K \quad (3.14)$$

называют постоянной расходомера, которая в системе СИ имеет размерность  $\text{м}^{2.5}/\text{с}$ ;  $\Delta p/\rho g = \Delta h$  — разность давлений, выраженная высотой столба транспортируемой жидкости, м.

Тогда теоретический расход жидкости

$$V_{\tau} = K \sqrt{\Delta h}. \quad (3.15)$$

Действительный расход жидкости  $V_{\tau д}$  меньше теоретического расхода:

$$V_{\tau д}/V_{\tau} = \mu < 1, \quad (3.16)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода; определяют опытным путем, результаты определения представляют в виде зависимости  $\mu = f(\text{Re})$  (здесь  $\text{Re} = vd/\nu$  — число Рейнольдса;  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ).

Действительный расход жидкости (в  $\text{м}^3/\text{с}$ )

$$V_{\tau д} = \mu K \sqrt{\Delta h}. \quad (3.17)$$

## Цель работы

1. Ознакомление с конструкцией нормализованных сужающих устройств.
2. Приобретение навыков работы с расходомерами переменного перепада давления.
3. Закрепление теоретического материала по практическому применению уравнения Д. Бернулли.

## Описание экспериментальной установки

В установке (рис. 3.5) жидкость из напорного бака 1 по трубопроводу 2 с сужающим устройством — трубой Вентури 6 — поступает в мерный бак 9. Расход изменяют с помощью регулирующего крана 7. Разность давления измеряют двумя пьезометрами 4. Водомерное стекло 10 со шкалой позволяет отобразить заданный объем воды  $V$ . Продолжительность  $\tau$  заполнения мерного бака фиксируется секундомером, температура — термометром 8.

Вода в бак 1 подается через разбрызгивающее устройство 5, уровень в баке поддерживается постоянным с помощью перелив-

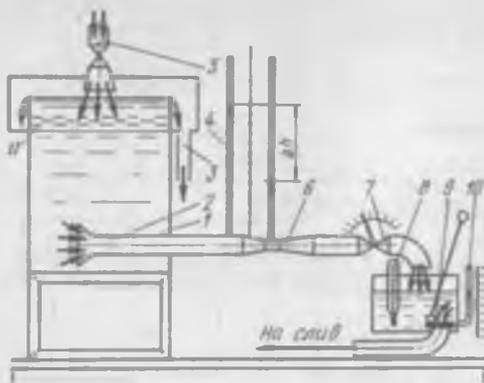


Рис. 3.5. Схема установки для тарировки расходомера:

1 — напорный бак; 2 — трубопровод; 3 — переливное устройство; 4 — пьезометры; 5 — разбрызгивающее устройство; 6 — труба Вентури; 7 — регулировочный край; 8 — термометр; 9 — мерный бак; 10 — водомерное стекло; 11 — успокоитель

ного устройства 3. Многослойный сетчатый успокоитель 11 предотвращает образование вихрей и обеспечивает постоянство скорости по горизонтальному сечению бака 1.

### Методика проведения испытания

В напорный бак 1 должно поступать воды заведомо больше, чем пойдет по трубопроводу 2. При испытании открывают кран 7 и устанавливают клапан мерного бака 9 на слив воды. После стабилизации уровней жидкости в пьезометрах 4 клапан бака 9 закрывают и одновременно включают секундомер. Измеряют разность уровней в пьезометрах 4 и температуру по термометру 8.

Секундомер останавливают и закрывают кран 7 после отбора указанного преподавателем объема воды. Опыт повторяют не менее 15 раз ( $N = 15$ ), постепенно увеличивая (уменьшая) степень открытия крана 7. Результаты наблюдений заносят в протокол испытания.

### Протокол испытания

$D = \dots$  м;  $d = \dots$  м

Номер опыта $n$	$V_n, \text{ м}^3$	$\Delta h_n, \text{ м}$	$\tau_n, \text{ с}$	$t_n, \text{ }^\circ\text{C}$	$v_n, \text{ м}^3/\text{с}$	Расход в $n$ -м опыте, $\text{м}^3/\text{с}$		$\mu_n$	$Re_n$
						$V_{гд}$	$V_{г}$		

рис. 3.6. Блок-схема алгоритма определения данных для построения зависимости  $V_{\tau a} = f(\Delta h)$  и  $\mu = f(Re)$

### Обработка результатов испытания

Данные для построения зависимостей  $V_{\tau a} = f(\Delta h)$  и  $\mu = f(Re)$  определяют по алгоритму, блок-схема которого приведена на рис. 3.6. После построения графика  $\mu = f(Re)$  выделяют горизонтальный участок кривой, для которой  $\mu = \text{const}$  (автомодельная область).

Если обозначить через  $N'$  — число опытов, в которых  $\mu = \text{const}$ , то можно рассчитать доверительную ошибку среднего значения  $\bar{\mu} = \sum_{u=1}^{N'} \mu_u / m$ , следуя соответствующему алгоритму и приняв  $\mu = \bar{\mu}$  (см. рис. 1.4).

Для автомодельной области результаты испытаний следует представить в таком виде:

$$\mu = \bar{\mu} \pm \varepsilon(\bar{\mu})$$

при  $P = 0,95$ .

### Вопросы для самопроверки

1. В чем отличие уравнения Бернулли для элементарной струйки от уравнения для потока реальной и идеальной жидкости?

2. В чем заключается энергетический смысл и геометрическая интерпретация уравнения Бернулли?

3. Почему постоянная расходомера имеет размерность  $m^2/s$ ?

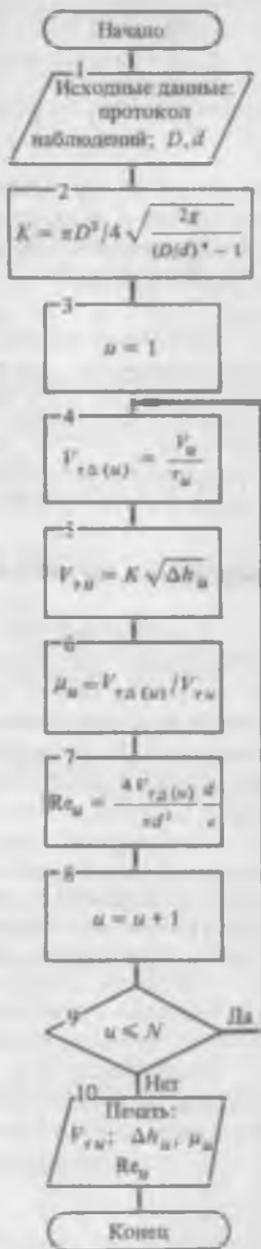
4. Как определить границы автомодельной области для коэффициента расхода  $\mu$ ?

5. Различные ли свойства капельной жидкости характеризуют динамический и кинематический коэффициенты вязкости?

6. В каком из пьезометров 4 (см. рис. 3.5) уровень жидкости будет выше и почему?

7. Перечислите методы измерения объемного расхода жидкости и приборы, при этом применяющиеся.

8. Что называется пьезометрической линией и линией полного напора?



9. Какие достоинства и недостатки имеют диафрагма, сопло и сопло Вентури?
10. Чем объяснить неравенство  $p_1 > p_2$  (см. рис. 3.4)?
11. Какую размерность имеют члены уравнения Бернулли?
12. Какие условия необходимо выполнить, чтобы расходомер можно было эксплуатировать без индивидуальной градуировки?

**Работа № 16. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ПО ДЛИНЕ И НЕКОТОРЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ**

Наиболее важной и часто встречающейся в гидравлике задачей является расчет трубопроводов, при котором уравнение Д. Бернулли для двух выбранных (заданных) сечений записывают в таком виде:

$$z_1 + p_1/\rho g + \alpha_1(v_1^2/2g) = z_2 + p_2/\rho g + \alpha_2(v_2^2/2g) + h_{n(1-2)}, \quad (3.18)$$

где  $h_{n(1-2)}$  — потери энергии движущейся по трубам жидкости между сечениями 1—1 и 2—2

$$h_{n(1-2)} = h_l + \sum h_m = \lambda(l/d)(v^2/2g) + \sum \zeta(v^2/2g). \quad (3.19)$$

Потеря энергии по длине трубопровода (в м)

$$h_l = \lambda(l/d)(v^2/2g). \quad (3.20)$$

Потеря энергии в области какого-либо местного сопротивления (в м)

$$h_m = \zeta(v^2/2g). \quad (3.21)$$

В формулах  $\lambda$  — коэффициент сопротивления по длине (безразмерная величина);  $l$  — длина трубопровода между выбранными сечениями, м;  $d$  — внутренний диаметр трубопровода, м;  $v$  — средняя скорость движения жидкости, м/с;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\zeta$  — коэффициент местного сопротивления (безразмерная величина).

Коэффициент  $\lambda$  для разных режимов с учетом зон движения жидкости может быть определен по известным формулам, а в некоторых случаях по справочным таблицам:

1) зона ламинарного режима ( $Re < 2320$ ):

$$\lambda = 64/Re,$$

где  $Re = vd/\nu$  — число Рейнольдса,  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;

2) зона, переходная от ламинарного к турбулентному режиму ( $2320 < Re < 4500$ ):

$\lambda = 0,029 + 0,775 (\text{Re} - 2320) \cdot 10^{-5}$  — формула Плевако;

3) зона гидравлически гладких труб ( $4500 \leq \text{Re} < 40d/\Delta$ ):

$\lambda = 0,3164/\text{Re}^{0,25}$  — формула Блазиуса;

$\lambda = (1,8 \lg \text{Re} - 1,5)^{-2}$  — формула Конакова;

4) зона неполной шероховатости ( $40d/\Delta \leq \text{Re} < 500d/\Delta$ ):

$\lambda = 0,11(\Delta/d) + 68/\text{Re}^{0,25}$  — формула Альтшуля;

$1/\sqrt{\lambda} = -2 \lg(\Delta/14,8R_r + 2,51/\text{Re}\sqrt{\lambda})$  — формула Кольтбрука.

здесь  $\Delta$  — средняя (эквивалентная) шероховатость труб, м;  $R_r$  — гидравлический радиус (отношение площади живого сечения к смоченному периметру), м;

5) квадратичная зона (зона полной шероховатости):  $\text{Re} > 500d/\Delta$ , можно пользоваться справочными таблицами, допустимо применять формулу Альтшуля и формулы:

$\lambda = (2 \lg d/\Delta + 1,14)^{-2}$  — формула Мурина;

$\lambda = 0,11 \sqrt{\Delta/d}$  — формула Шифринсона;

$\lambda = 8g/c^2$ ;  $c = (1/n)R_r^{\#}$ ;  $y = 2,5\sqrt{n} - 0,13$  —

—  $0,75\sqrt{R_r}(\sqrt{n} - 0,1)$  — формула Павловского,

где  $c$  — коэффициент Шези,  $\text{м}^{0,5}/\text{с}$ ;  $n$  — коэффициент шероховатости (безразмерная величина).

Коэффициенты местных сопротивлений  $\zeta$ , являющихся источником искусственной турбулизации, меньше зависят от зоны движения жидкости (в соответствующих зависимостях обычно берут зону движения жидкости за местным сопротивлением). При  $\text{Re} > 10^3$  практически наступает автомодельная область, поэтому в справочниках величины  $\zeta$  или соответствующие формулы для их определения даются, как правило, вне зависимости от  $\text{Re}$ :

коэффициент при внезапном расширении трубопровода

$$\zeta_{\text{вн.р}} = (S_2/S_1 - 1)^2,$$

где  $S_1$  и  $S_2$  — площади трубопровода до и после сопротивления;

коэффициент при внезапном сужении трубопровода

$$\zeta_{\text{вн.с}} = (1/\epsilon - 1)^2,$$

где  $\epsilon$  — коэффициент сжатия струи в узкой части трубопровода.

$$\epsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - S_2/S_1},$$

коэффициент при постепенном расширении трубопровода

$$\zeta_{\text{п.р}} = k_{\text{п.р}} \zeta_{\text{вн.р}},$$

где  $k_{\text{п.р}} = f(\alpha)$ .

Угол конусности $\alpha$ , град	4	8	10	12	15	20	30	60
Коэффициент смягчения $k_{\alpha}$	0,08	0,14	0,16	0,22	0,30	0,42	0,8	0,95

коэффициент при постепенном сужении трубопровода

$$\zeta_{пс} = k_{пс} \zeta_{нс}$$

Угол конусности $\alpha$ , град	10	20	40	80	100	140
Коэффициент смягчения $k_{\alpha}$	0,4	0,25	0,2	0,3	0,4	0,6

коэффициент сопротивления при плавном повороте трубы на угол  $\alpha$

$$\zeta_{\alpha} = \zeta_{90} \cdot a.$$

При  $\alpha < 90^\circ$   $a = \sin \alpha$  (формула Миловича), при  $\alpha > 90^\circ$   $a = 0,7 + 0,35 \frac{\alpha}{100}$  (формула Некрасова);

коэффициент сопротивления при повороте на  $90^\circ$

$$\zeta_{90} = [0,2 + 0,01 (100\lambda)^8 \sqrt{d/R}],$$

где  $d/R$  — отношение диаметра трубопровода к радиусу закругления, формула Альтшуля.

## Цель работы

1. Освоение методики экспериментального определения коэффициента сопротивления по длине и коэффициентов местных сопротивлений.

2. Установление характера зависимости найденных коэффициентов от числа Рейнольдса.

3. Сопоставление полученных экспериментальных значений коэффициентов сопротивления со справочными и аналитическими данными.

4. Проведение статистического анализа полученных результатов для автотомельной области.

## Описание экспериментальной установки

На установке (рис. 3.7) можно определить коэффициенты сопротивления по длине для трубопроводов двух диаметров  $d$  и  $D$  и коэффициенты ряда местных сопротивлений.

Установившийся режим движения жидкости в системе обеспечивается постоянством уровня жидкости в баке 3. Расход регулируется вентилем 2 на нагнетательной коммуникации центробежного насоса 1. Вентиль 8 открывают лишь в начале опыта на короткое время (1—1,5 мин). Уровни в баках контролируют по водомерным трубкам 4.

В баке установлены многослойный сетчатый пояс 6 достаточ-

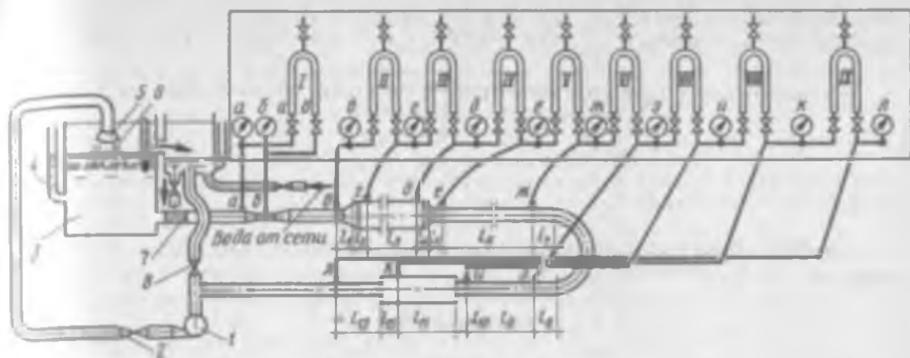


Рис. 3.7. Схема установки для определения коэффициентов сопротивления: 1 — насос; 2, 8 — вентили; 3 — бак; 4 — водомерные трубки; 5 — разбрызгивающее устройство; 6 — сетчатый пояс; 7 — пучок труб

но большого живого сечения, в трубопроводе — пучок тонкостенных труб малого диаметра 7 для предотвращения влияния воды, поступающей в бак 3 через разбрызгивающее устройство 5, на режим движения жидкости в трубопроводе.

### Методика проведения испытания

При отключенных дифманометрах I — IX и закрытом вентиле 2 пускают насос 1, затем, приоткрывая вентиль 2, обеспечивают заполнение системы водой. После этого удаляют воздух из дифманометров и соединительных трубок. Не останавливая насоса, проводят первый опыт при самом малом расходе (о величине расхода судят по показаниям дифманометра I или по разности показаний чувствительных мановакуумметров а и б).

Снимают показания дифманометров или соответствующих мановакуумметров (записывают в протокол со знаком «+» избыточное давление и со знаком «—» вакуум). Устанавливают несколько больший расход и повторяют измерения (второй опыт). Всего проводят 8—10 опытов при разном расходе. Записывают температуру воды в начале эксперимента и в конце, принимают среднюю температуру за температуру воды в течение всего эксперимента.

### Методика расчета коэффициентов сопротивления

Расчет коэффициентов сопротивления по длине  $\lambda_d$  и  $\lambda_D$  и местных сопротивлений  $\zeta_{пр}$ ,  $\zeta_{ис}$ ,  $\zeta_{180^\circ}$ ,  $\zeta_{запр}$  и  $\zeta_{анс}$  осуществляют в соответствии с алгоритмом, блок-схема которого представлена на рис. 3.8.

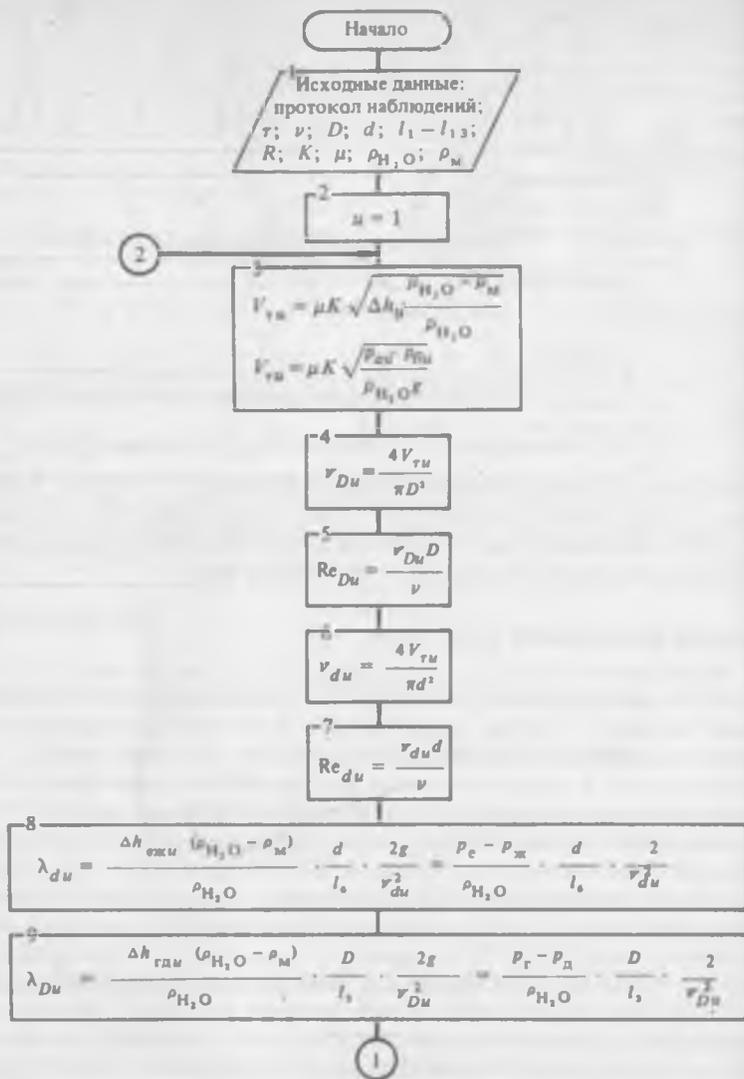


Рис. 3.8. Блок-схема алгоритма получения данных для построения

1

$$\xi_{\text{н.р}}(u) = \frac{2g}{v_{Dn}^2} \left( \Delta h_{\text{н.р}}(u) \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} - \rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \right) - \lambda_{du} \frac{l_1}{d} \frac{v_{du}^2}{2g} - \lambda_{Du} \frac{l_2}{D} \frac{v_{Du}^2}{2g}$$

$$\xi_{\text{н.с}}(u) = \frac{2g}{v_{du}^2} \left( \Delta h_{\text{н.с}}(u) \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} - \rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \right) - \lambda_{Du} \frac{l_2}{D} \frac{v_{Du}^2}{2g} - \lambda_{du} \frac{l_1}{d} \frac{v_{du}^2}{2g}$$

$$\xi_{\text{180}^\circ}(u) = \frac{2g}{v_{du}^2} \left( \Delta h_{\text{н.с}}(u) \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} - \rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \right) - \lambda_{du} \frac{l_1 + l_2 + \pi R}{d} \frac{v_{du}^2}{2g}$$

$$\xi_{\text{н.р}}(u) = \frac{2g}{v_{Dn}^2} \left( \Delta h_{\text{н.р}}(u) \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} - \rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \right) - \lambda_{du} \frac{l_{12}}{d} \frac{v_{du}^2}{2g} - \lambda_{Du} \frac{l_{12}}{D} \frac{v_{Du}^2}{2g}$$

$$\xi_{\text{н.с}}(u) = \frac{2g}{v_{du}^2} \left( \Delta h_{\text{н.с}}(u) \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} - \rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \right) - \lambda_{Du} \frac{l_{12}}{D} \frac{v_{Du}^2}{2g} - \lambda_{du} \frac{l_{12}}{d} \frac{v_{du}^2}{2g}$$

15  
 $u = u + 1$

16  
Да  $u \leq N$   
Нет

17  
Печать:  
 $\lambda_d = f_1(\text{Re}_d)$ ;  $\lambda_D = f_2(\text{Re}_D)$ ;  
 $\xi_{\text{н.р}} = f_3(\text{Re}_D)$ ;  
 $\xi_{\text{н.с}} = f_4(\text{Re}_d)$ ;  
 $\xi_{\text{н.р}} = f_5(\text{Re}_D)$ ;  
 $\xi_{\text{н.с}} = f_6(\text{Re}_d)$ ;  
 $\xi_{180^\circ} = f_7(\text{Re}_d)$ .

Конец

зависимости коэффициентов  $\lambda$  и  $\xi$  от числа  $\text{Re}$

Б л о к 1. Исходными данными будут результаты измерений, записанные в протоколе наблюдений, и параметры, характеризующие лабораторную установку и свойства транспортируемой жидкости.

Б л о к 2. Присвоение  $u = 1$ .

Б л о к 3. Расчет расхода. Приводятся две формулы, одна из которых используется при замере разности давления дифманометрами, вторая — при замере разности давления двумя мановакуумметрами. В следующих блоках для расчета разности давления приводится формула, в которой используются лишь показания дифманометров. Если придется использовать показания соответствующих мановакуумметров, то в расчетных соотношениях блоков 8—14 вместо выражения  $\Delta h \frac{\rho_{H,O} - \rho_u}{\rho_{H,O}}$  следует применить  $(p - p')/\rho g$ .

Б л о к и 4—9. Расчетные соотношения получены из определения расхода  $V_r = v(\pi d^2/4)$  и формулы (3.20).

Б л о к 10. Потери энергии между сечениями  $v$  и  $z$

$$\Delta h_{e, z(u)} \frac{\rho_{H,O} - \rho_u}{\rho_{H,O}} = \frac{p_{e,u} - p_{z,u}}{\rho g}$$

складываются из потерь по длине  $l_1$ , равных  $\lambda_{d1} \left(\frac{l_1}{d}\right) \left(\frac{v_{D,u}^2}{2g}\right)$ , по длине  $l_2$ , равных  $\lambda_{D2} \left(\frac{l_2}{D}\right) \left(\frac{v_{D,u}^2}{2g}\right)$ , и потерь при плавном расширении,  $\zeta_{n,p} \frac{v_{D,u}^2}{2g}$ , т. е.

$$\Delta h_{e, z(u)} \frac{\rho_{H,O} - \rho_u}{\rho_{H,O}} = \lambda_{d1} \frac{l_1 v_{D,u}^2}{d^2 g} + \lambda_{D2} (l_2/D) \times \times (v_{D,u}^2/2g) + \zeta_{n,p} (v_{D,u}^2/2g).$$

#### Протокол испытания

Номер опыта $u$	Показания дифманометров $\Delta h$ (в м) или разность показаний соответствующих мановакуумметров в $u$ -м опыте. Па								
	I(аб)	II(вг)	III(гд)	IV(де)	V(еж)	VI(жз)	VII(зи)	VIII(ик)	IX(кл)

Номер опыта $u$	Оценки параметров в $u$ -м опыте								Примечание
	$V_r, \text{ м}^3/\text{с}$	$\lambda_D$	$\lambda_d$	$\zeta_{n,p}$	$\zeta_{n,c}$	$\theta_{180^\circ}$	$\zeta_{n,r}$	$\zeta_{n,c}$	

Решая полученное уравнение относительно  $\zeta_{0p(u)}$ , получим выражение, записанное в блоке 10.

Блоки 11—14. Расчетные соотношения для определения соответствующих  $\zeta$  получены аналогичным блоку 10 методом.

Блоки 15—17 пояснений не требуют.

Зависимость  $\lambda_d = f_1(Re_d)$  и  $\lambda_D = f_2(Re_D)$  строят в координатах  $\lg(100\lambda) = f(\lg Re)$ , соответствующих координатам графика Никурадзе.

Полученные эмпирические величины  $\lambda$  и  $\zeta$  сравнивают с рассчитанными по соответствующим формулам в таком порядке.

По заданной преподавателем шероховатости, используя приведенные выше формулы, определяют зону движения жидкости по трубопроводу диаметром  $d$  или  $D$  в каждом опыте. Для каждого опыта зная зону, по соответствующим формулам или таблицам находят  $\lambda_p$  и  $\zeta_p$  и пунктиром на тех же графиках строят расчетные кривые. Отклонения эмпирических величин коэффициентов от расчетных оценивают относительным отклонением:

$$\Delta\lambda_u = \left| \frac{\lambda_p - \lambda}{\lambda_p} \right|_u \quad \text{и} \quad \Delta\zeta_u = \left| \frac{\zeta_p - \zeta}{\zeta_p} \right|_u.$$

Результаты расчетов записывают в протокол № 2, который следует составить самостоятельно.

На полученных графиках можно выделить так называемую автомодельную область, когда  $\lambda$  и  $\zeta$  не зависят от числа Рейнольдса (горизонтальный участок кривых).

Затем выбирают какой-либо график, на котором наиболее четко выделилась автомодельная область, и по экспериментальным точкам, давшим горизонтальный участок, рассчитывают доверительную ошибку средней величины коэффициента для автомодельной области в соответствии с алгоритмом «Модуль  $e(\bar{y})$ », приведенным в главе 1 (см. рис. 1.4). Следует помнить, что символ « $y$ » следует заменить на символ соответствующего коэффициента сопротивления и что  $m$  — число экспериментальных точек в автомодельной области.

#### Вопросы для самопроверки

1. Почему при расчетах трубопровода необходимо знать число  $Re$ ?
2. Назовите и охарактеризуйте пять зон движения жидкости. Какие зоны относятся к турбулентному режиму?
3. Для каких зон коэффициент  $\lambda$  зависит от числа  $Re$ , для каких — лишь от шероховатости?
4. Каким образом можно определить начало автомодельной области?
5. Почему потери энергии при внезапном сужении (расширении) больше, чем при плавном?
6. Каким образом можно найти величину эквивалентной шероховатости, используя экспериментальные данные, полученные в процессе выполнения данной работы?

7. Почему при измерении расхода с помощью сужающих устройств определяют давление в сечениях, расположенных в непосредственной близости от сужающих устройств, а при экспериментальном определении коэффициентов отбор давления осуществляют на достаточно большом от местного сопротивления расстоянии?

8. Для каких труб (новых или старых, чистых или с отложениями на внутренней поверхности) коэффициенты  $\lambda$  будут иметь при прочих равных условиях большее численное значение?

9. Увеличивается (или уменьшается) потеря жидкостью энергии и численная величина  $\lambda$  при последовательной смене зон движения от зоны ламинарного режима до квадратичной в данной трубе?

#### Список использованной литературы

Гидравлика, гидромашинны и гидроприводы / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. — М.: Машиностроение, 1982. — 422 с.

Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П. К. Киселева. 5-е изд. — М.: Энергия, 1974. — 312 с.

#### Работы № 17. ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАСТНОГО НАСОСА И АПРОБАЦИЯ РАЗНЫХ МЕТОДОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЕГО РАБОТЫ

Лопастные насосы, получившие широкое распространение на предприятиях пищевой промышленности, обеспечивают большие подачи  $V$ , при сравнительно небольших напорах  $H$ . Лопастные насосы мало чувствительны к наличию в транспортируемых жидкостях взвесей, просты в эксплуатации, их ремонт несложен и может осуществляться в мастерских предприятия.

Каждый лопастной насос имеет паспорт, в котором описаны конструкция и особенности его эксплуатации, даны характеристики в виде графических зависимостей:

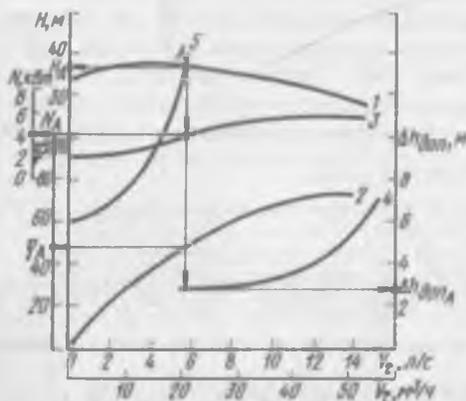


Рис. 3.9. Характеристики насоса К-45-30 при  $D = 168$  мм,  $n = 2900$  мин<sup>-1</sup>.

1 —  $n = f_1(V_g)$ ; 2 —  $\alpha = f_2(V_g)$ ; 3 —  $N = f_3(V_g)$ ; 4 —  $\Delta h_{доп} = f_4(V_g)$ ; 5 — характеристика сети

$$H = f_1(V_g); \quad \eta = f_2(V_g);$$

$$N = f_3(V_g); \quad \Delta h_{доп} = f_4(V_g).$$

На рис. 3.9 изображены основные характеристики насоса:

полный напор насоса  $H$  — энергия, сообщаемая насосом единице веса жидкости, равная разности полных удельных энергий после насоса  $H_{II}$  и перед ним  $H_I$  (в м):

$$H = H_{II} - H_I = (z_{II} - z_I) + \frac{p_{II} - p_I}{\rho g} + \frac{\alpha_{II} v_{II}^2 - \alpha_I v_I^2}{2g}; \quad (3.22)$$



или

$$H_{\text{потр}} = \{[\zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{завд вс}} + \zeta_{90^\circ} + \zeta_{\text{вн с}} + \zeta_{\text{вн р}}(d_{\text{вс}}/D)^4] \times \\ \times (d_{\text{нр}}/d_{\text{вс}})^4 + [\zeta_{\text{завд нр}} + \zeta_{90^\circ} + \lambda_{\text{нр}}(l_{\text{вг}}/d_{\text{нр}})]\} (16/2g\pi^2 d_{\text{нр}}^4) V_{\tau}^2.$$

Точка пересечения характеристик  $H = f_1(V_{\tau})$  (кривая 4) и  $H_{\text{потр}} = f(V_{\tau})$  (кривая 5) определяет режим работы насоса и называется рабочей точкой (см. рис. 3.9, точка А). Прикрывая задвижку, можно получить более крутую характеристику сети, и следовательно, другое положение рабочей точки и другой режим работы насоса (дрессельное регулирование).

Фактический КПД насоса при этом по сравнению с паспортным  $\eta$  уменьшится:

$$\eta_{\text{ф}} = \eta - \Delta H/H, \quad (3.27)$$

где  $\Delta H$  — напор, необходимый для преодоления сопротивления задвижки, м.

Положение рабочей точки можно изменить, регулируя частоту вращения лопастного колеса. Для построения характеристики насоса  $H = f_1(V_{\tau})$  при новой частоте вращения лопастного колеса пользуются соотношениями подобия, полученными для одинакового КПД насоса:

$$V_{\tau 1}/V_{\tau 2} = n_1/n_2, \quad H_1/H_2 = (n_1/n_2)^2, \quad N_1/N_2 = (n_1/n_2)^3. \quad (3.28)$$

Изменить подачу жидкости потребителю можно также перепуском (сбросом) части жидкости из нагнетательной коммуникации в питающий бак или во всасывающую коммуникацию. В этом случае (см. рис. 3.10) весь полный напор насоса (в м) расходуется на преодоление сопротивлений сбросной коммуникации:

$$H = [\zeta_{\text{сбос}} + \lambda_{\text{сбр}}(l_{\text{сбр}}/d_{\text{сбр}}) + \zeta_{\text{завд}}] (16V_{\tau \text{сбр}}^2/2g\pi^2 d^4). \quad (3.29)$$

Зная величину сброса  $V_{\tau \text{сбр}}$  и паспортный КПД насоса при той подаче  $V_{\tau}$ , которую достигает в этот момент насос, можно рассчитать фактический КПД:

$$\eta_{\text{ф}} = \eta - V_{\tau \text{сбр}}/V_{\tau}. \quad (3.30)$$

### Цель работы

1. Проведение испытания лопастного насоса, построение характеристик  $H = f_1(V_{\tau})$ ,  $\eta = f_2(V_{\tau})$ ,  $N = f_3(V_{\tau})$ ,  $\Delta h_{\text{завд}} = f_4(V_{\tau})$  и оценка погрешности построенных характеристик.

2. Регулирование до заданной преподавателем величины подачи  $V_{\tau}$  тремя методами — дрессельное регулирование, изменение частоты вращения, перепуск части жидкости, расчет, где это необходимо, фактических КПД и сравнение экспериментальных результатов с расчетными.

## Описание экспериментальной установки

Установка (см. рис. 3.10) состоит из насоса 1, приводимого во вращение балансирующим электродвигателем постоянного тока 2, снабженным устройством 3 для измерения момента и тахометром 4 для определения частоты вращения, коммуникаций — всасывающей ( $l_{вс}$ ,  $d_{вс}$ ), нагнетательной ( $l_{нг}$ ,  $d_{нг}$ ) и перепускной ( $l_{обр}$ ,  $d_{обр}$ ).

На нагнетательной коммуникации смонтированы расходомер с сужающим устройством 10 и двумя мановакуумметрами 10' и 10'', регулирующая задвижка 9 и манометр 13.

На всасывающей коммуникации размещены задвижка 7, два мановакуумметра 7' и 7'', расширение 6, необходимое для осуществления кавитационных испытаний, и мановакуумметр 5 перед насосом.

На перепускной коммуникации установлены задвижка 12, мановакуумметры 12', 12'' и расходомер с сужающим устройством 11 и мановакуумметрами 11' и 11''. При помощи крана 8 из всасывающей коммуникации удаляют воздух.

Плечо груза 3'' устанавливают при снятом грузе 3' и холостом вращении электродвигателя, не соединенного кулачковой муфтой с насосом, с частотой, равной половине максимальной.

## Методика проведения испытания

При закрытых задвижках 9 и 12 и открытой задвижке 7 пускают насос. Задвижку 9 открывают полностью и реостатом устанавливают по тахометру частоту вращения  $n_1$ , равную 0,8 максимальной частоты вращения лопастного колеса. Наличие трехходовых краников у приборов для измерения давления обуславливает заполнение соединительных трубок водой при удалении через краники воздуха.

Передвигая груз 3', переводят электродвигатель 2 в равновесное положение.

Получение данных, необходимых при построении характеристик, и апробация метода регулирования насоса изменением частоты вращения. В протокол № 1 записывают показания приборов 13, 5, 10', 10'', 4 и величину плеча  $R$  при полностью открытой задвижке 9 ( $u=1$ ,  $k=1$ ).

Частоту вращения колеса  $n_1$  изменяют до заданных преподавателем  $n_2$  и затем до  $n_3$ , записывая в протокол № 1 показания тех же приборов и величину плеча ( $u=II$ ;  $u=III$ ;  $k=1$ ). Прикрывая задвижку 9, уменьшают подачу на 10—15 % и реостатом восстанавливают прежнюю частоту вращения  $n_1$ , после чего повторяют измерения и производят соответствующую запись в протоколе № 1 ( $u=1$ ,  $k=2$ ).

Не меняя положения задвижки 9, уменьшают частоту вращения до  $n_2$  и затем до  $n_3$  и производят соответствующие замеры и записи в протоколе № 1 ( $u=II$ ;  $u=III$ ;  $k=2$ ). Задвижку 9 прикрывают несколько раз еще больше с таким расчетом, чтобы до полного прекращения подачи было не менее семи таких замеров при каждой из трех частот вращения ( $u=I-III$ ;  $k=3-7$ ).

Чтобы получить данные для построения характеристики  $\Delta h_{\text{зоп}} = f_4(V_T)$  при  $n_1 = \text{const}$ , производят запись в протокол № 2 показаний приборов 10', 10'', 13, 5 и величины плеча  $R$  при не полностью открытой ( $\sim 0,75$ ) задвижке 9 и полностью открытой задвижке 7 ( $u=I$ ,  $k=1$ ).

Прикрывают пять—семь раз на 15—20 % задвижку 7 вплоть до срыва работы насоса, производят соответствующие записи в протоколе № 2 ( $u=I$ ,  $k=2-7$ ). Перед снятием показаний приборов восстанавливают частоту вращения  $n_1$  и расход (показание приборов 10' и 10''), изменяя положение реостата и задвижки 9.

Устанавливают несколько меньший расход  $V_{T,II}$ , прикрывая задвижку 9 при полностью открытой задвижке 7 ( $u=II$ ,  $k=1$ ), и повторяют замеры, изменяя пять—семь раз положение задвижки 7 и восстанавливая  $n_1$  и новый расход  $V_{T,II}$ , записывают результаты в протокол № 2 ( $u=II$ ,  $k=2-7$ ).

Измерения повторяют еще для трех значений расходов с тем, чтобы для построения характеристики  $\Delta h_{\text{зоп}} = f_4(V_T)$  было хотя бы пять точек ( $N \geq 5$ ).

Получение данных для определения  $\eta_p$  при дроссельном регулировании работы насоса. При полностью открытых задвижках 7 и 9 и частоте вращения  $n_1$  определяют расход и полный напор (протокол № 3,  $u=I$ ,  $k=1$ ). Затем изменяют расход приблизительно на 15 %, уменьшая частоту вращения, и измеряют расход (10' и 10'') и полный напор насоса (13 и 5) ( $u=I$ ,  $k=2$ ).

Частоту вращения уменьшают еще три—пять раз, каждый раз определяя и записывая расход и полный напор ( $u=I$ ,  $k=3-7$ ). Далее уменьшают степень открытия задвижки 9 и повторяют измерения, записывая результаты в протокол № 3 ( $u=II$ ,  $k=1-7$ ).

Получение данных для определения  $\eta_p$  при регулировании работы насоса перепуском части жидкости. При частоте вращения  $n_1$  и открытых задвижках 7 и 9 приоткрывают на 0,3—0,4 задвижку 12 на перепускной коммуникации с тем, чтобы получить заданный преподавателем расход  $V_T$ , и восстанавливают частоту вращения  $n_1$ .

В протокол № 4 записывают показания приборов 10', 10'', 13, 5, 11', 11''.

Протокол № 1

$n$	$n_0$ , мин <sup>-1</sup>	$k_n$	$P_{\text{вращ}} \text{ Па}$	$P_{\text{связ}} \text{ Па}$	$V_{\text{вход}} \text{ м}^3/\text{с}$	$P_{\text{вращ}} \text{ Па}$	$P_{\text{связ}} \text{ Па}$	$R_{\text{вход}} \text{ м}$	$H_{\text{вход}} \text{ м}$	$N_{\text{вход}} \text{ Вт}$	$N_{\text{связ}} \text{ Вт}$	$\eta_{\text{вх}} \%$

Примечание. Здесь  $n$  — номер эксперимента при определенной частоте  $n_0$ ;  $k$  — номер опыта в эксперименте при разном положении задвижки 9.

Протокол № 2

$n$	$P_{\text{вращ}} \text{ Па}$	$P_{\text{связ}} \text{ Па}$	$V_{\text{вход}} \text{ м}^3/\text{с}$	$k_{\text{вх}}$	$P_{\text{вращ}} \text{ Па}$	$P_{\text{связ}} \text{ Па}$	$R_{\text{вход}} \text{ м}$	$H_{\text{вход}} \text{ м}$	$N_{\text{вход}} \text{ Вт}$	$N_{\text{связ}} \text{ Вт}$	$\eta_{\text{вх}} \%$

Примечание. Здесь  $n$  — номер эксперимента при определенном расходе  $V_{\text{вход}}$ ;  $k$  — номер опыта в эксперименте при разном положении задвижки 7.

Протокол № 3

$n$	$k_n$	$P_{\text{вращ}} \text{ Па}$	$P_{\text{связ}} \text{ Па}$	$V_{\text{вход}} \text{ м}^3/\text{с}$	$P_{\text{вращ}} \text{ Па}$	$P_{\text{связ}} \text{ Па}$	$R_{\text{вход}} \text{ Па}$	$H_{\text{вход}} \text{ м}$	$\Delta H, \text{ м}$	$\eta_{\text{вх}}$

Примечание. Здесь  $n$  — номер эксперимента при определенном положении задвижки 9;  $k$  — номер опыта в эксперименте при разном частоте вращения (разной подаче).

$p_{\text{м10}},$ Па	$p_{\text{м10}},$ Па	$V_{\text{т}},$ м <sup>3</sup> /с	$p_{\text{м13}},$ Па	$p_{\text{м6}},$ Па	$H,$ м	$p_{\text{м11}},$ Па	$p_{\text{м12}},$ Па	$V_{\text{упр}},$ м <sup>3</sup> /с	$\eta$

### Обработка результатов испытания

Построение характеристик  $H=f_1(V_{\text{т}})$ ,  $\eta=f_2(V_{\text{т}})$  и  $N=f_3(V_{\text{т}})$ . Характеристики строят для трех разных частот вращения лопастиного колеса (см. протокол № 1). Получение данных для построения этих характеристик осуществляют в соответствии с блок-схемой алгоритма, приведенной на рис. 3.11.

В качестве исходных данных используют результаты измерения, приведенные в протоколе № 1, а также плотность  $\rho$ , диаметры всасывающей  $d_{\text{вс}}$  и нагнетательной  $d_{\text{нт}}$  коммуникаций, постоянную расходомера  $K_{10}$ . Данные для построения характеристик записывают в соответствующие графы протокола № 1 (выводят на печать). Построенные характеристики могут отличаться от паспортных для испытываемого насоса. Следует попытаться объяснить причины такого отличия.

Построение характеристики  $\Delta h_{\text{ном}}=f_4(V_{\text{т}})$ . Приведенные в протоколе № 2 результаты замеров в соответствии с алгоритмом, блок-схема которого приведена на рис. 3.12, используются для получения графических зависимостей  $H$ ,  $N$  и  $\eta$  от кавитационного запаса  $\Delta h$  для каждого значения подачи  $V_{\text{тв}}$ .

Блок 1. Исходными данными являются результаты измерений, записанные в протоколе № 2, а также постоянная расходомера  $10-K_{10}$ ; плотность жидкости  $\rho$ ; давление насыщенных паров жидкости —  $p_{\text{нп}}$ ; диаметры всасывающей и нагнетательной коммуникаций —  $d_{\text{вс}}$ ,  $d_{\text{нт}}$ ;  $\Delta z=z_{13}-z_6$ , номер опыта в эксперименте  $k$ ; номер эксперимента  $u$ ; число опытов в  $u$ -м эксперименте  $m_u$ ; число экспериментов  $N$ ; барометрическое давление  $p_6$ ; коэффициент распределения скорости движения жидкости по сечению потока  $\alpha \approx 1$ .

Блок 2. Присвоение  $u=1$ .

Блок 3. Расчет расхода в  $u$ -м эксперименте (см. работу № 15).

Блок 4. Расчет скорости во всасывающей коммуникации.

Блок 5. Расчет скорости в нагнетательной коммуникации.

Блок 6. Присвоение  $k=1$ .

Блок 7. Расчет полного напора насоса.

Блок 8. Расчет потребляемой насосом мощности.

Блок 9. Расчет полезной мощности насоса.

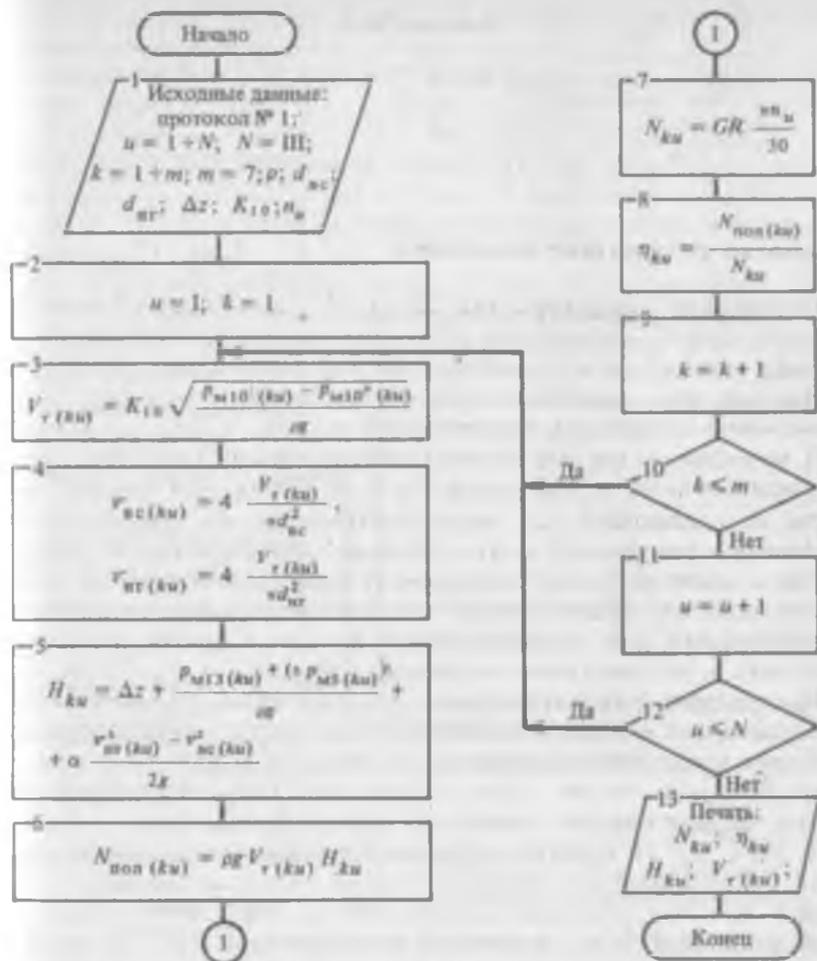


Рис. 3.11. Блок-схема алгоритма получения данных для построения характеристик  $H = f_1(V_r)$ ,  $\eta = f_2(V_r)$ ,  $N = f_3(V_r)$

Блок 10. Расчет КПД насоса.

Блок 11. Расчет кавитационного запаса.

Блок 12. Присвоение  $k = k + 1$ .

Блок 13. Блок сравнения.

Блок 14. Присвоение  $u = u + 1$ .

Блок 15. Блок сравнения.

Блок 16. На печать выведены данные для построения графических зависимостей  $H$ ,  $N$  и  $\eta$  от  $\Delta h$  при разных подачах  $V_r$ . Построенные графики позволяют определить следующие ве-

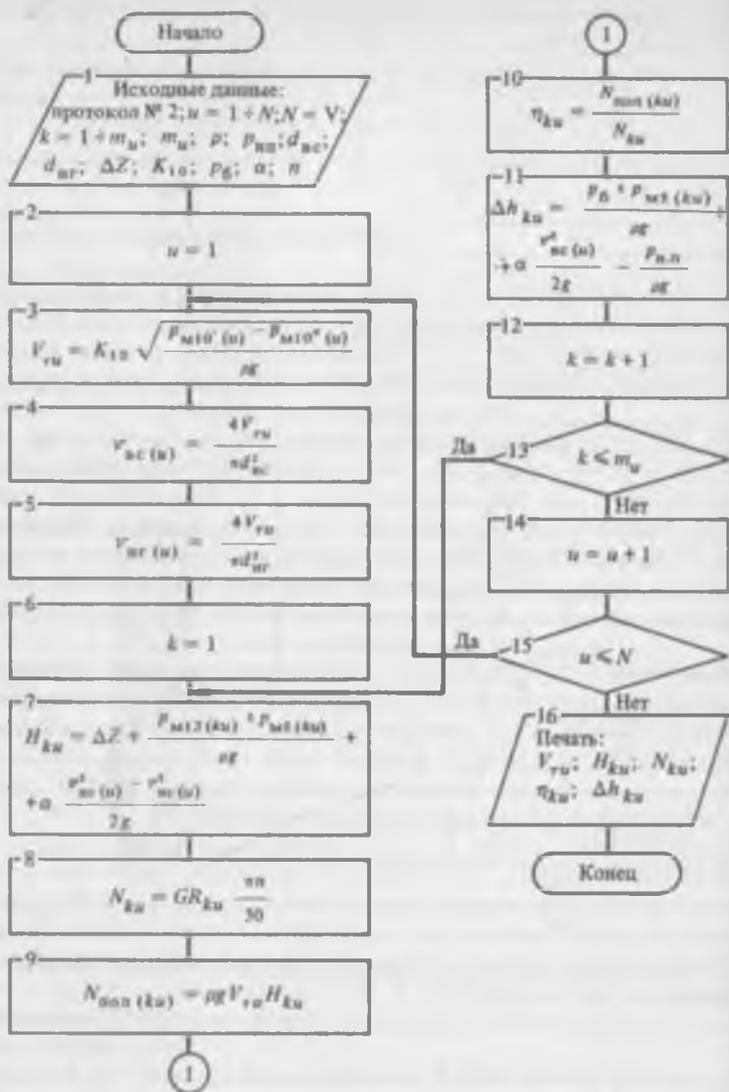


Рис. 3.12. Блок-схема алгоритма получения данных для построения характеристики  $\Delta h_{\text{зоп}} = f(d, V_r)$ .

личины: первый критический кавитационный запас  $\Delta h_{\text{кр}1}$ , когда при уменьшении  $\Delta h$  горизонтальные кривые начнут снижаться и это снижение достигнет почти 2%; второй критический кавитационный запас  $\Delta h_{\text{кр}2}$ , при котором происходит срыв работы насо-

са. Допустимый кавитационный запас определяют по соотношению (3.24).

На совмещенном с другими характеристиками графике строят зависимость  $\Delta h_{\text{доп}} = f_4(V_{\tau})$ , причем все характеристики должны быть получены при одной и той же частоте вращения  $n_1$ .

**Апробация регулирования работы насоса изменением частоты вращения.** Цель апробации состоит в сравнении характеристик при новой  $n_2$  частоте вращения, полученных экспериментально и расчетом.

На отдельном графике вычерчивают характеристики насоса  $H = f_1(V_{\tau})$  при частотах вращения  $n_1$  и  $n_2$  по данным протокола № 1, наносят на тот же график характеристику сети при полностью открытой задвижке 9 по данным протокола № 3. Находят новую рабочую точку, обозначая ее, например,  $A_2(V_{\tau 2}, H_2)$ , по заданному расходу  $V_{\tau 2}$  для частоты вращения  $n_2$ .

Параболу подобных режимов строят по уравнению  $H = (H_2/V_{\tau 2}^2)V_{\tau}^2$ , задавая несколько значений  $V_{\tau}$  и рассчитывая  $H$ . Для системы, изображенной на рис. 3.10, парабола подобных режимов будет приближенно совпадать с характеристикой сети, если в интервале принятых расходов режим движения жидкости будет соответствовать режиму квадратичной зоны. Следует отметить, что если  $h_{\text{вс}} \neq h_{\text{нр}}$ , то характеристика сети будет выходить не из начала координат и совпадения не будет.

Точка пересечения параболы подобных режимов с характеристикой насоса при  $n_1$ , обозначенной, например,  $A_1$  дает режим  $H_1 = H_{A_1}$  и  $V_{\tau 1} = V_{\tau A_1}$ , подобный режиму работы насоса в точке  $A_2$  при одинаковом КПД ( $\eta_2 = \eta_1$ ).

Новую частоту вращения  $n_{2p}$  можно рассчитать по любому из двух первых соотношений подобия (3.28):

$$n_{2p} = n_1(V_{\tau 2}/V_{\tau 1}) \cong n_1(H_1/H_2)^2.$$

Знак  $\sim$  (приближенно) поставлен в связи с некоторым несовпадением результатов из-за неточности графических построений. Число  $n_{2p}$  округляют в большую сторону и принимают к реализации.

Зная частоту вращения  $n_{2p}$  по двум первым соотношениям (3.28) и задавая величины  $V_{\tau i}$  и  $H_i$  пять ( $i \geq 1-5$ ) раз, находят соответственно точки  $V_{\tau 2i}$  и  $H_{2i}$ , которые используют для построения характеристики  $H = f_1(V_{\tau})$  при  $n_{2p}$ . Характеристику наносят пунктиром на тот же график. Причины несовпадения характеристик  $H = f_1(V_{\tau})$  при  $n_2$  и  $n_{2p}$ , если оно имеет место, необходимо постараться объяснить.

**Определение  $\eta_0$  при дроссельном регулировании работы насоса.** Фактический КПД насоса находят по соотношению (3.27), в котором напор, необходимый для преодоления сопротивления задвижки 9,

$$\Delta H = H_1 - H_2,$$

где  $H_1$  — напор, развиваемый насосом при заданной подаче,  $V_{т}$ ;  $H_2$  — напор, необходимый для обеспечения заданной подачи по сети при полностью открытой задвижке 9.

Величины  $H_1$  и  $H_2$  снимают с графика, на который наносят характеристику насоса при  $n_1$  по данным протокола № 1 и две характеристики сети при полностью открытой задвижке 9 (протокол № 3,  $u=1$ ) и прикрытой задвижке 9 (протокол № 3,  $u=11$ ).

Определение  $\eta_\phi$  при регулировании работы насоса сбросом части жидкости. Расход  $V_{т\text{сбр}}$  определяют графическим построением. С этой целью на график наносят характеристики насоса при частоте вращения  $n_1$  (протокол № 1) и характеристики сети при полностью открытой задвижке 9 (протокол № 3,  $u=1$ ). Для заданного преподавателем расхода  $V_t$  (см. протокол № 4) по графику определяют требуемый напор  $H_{\text{портр}}$  и расход  $V_{т1}$ , который обеспечивает насос при  $H = H_{\text{портр}}$ . Затем находят  $V_{т\text{сбр}} = V_{т1} - V_t$ . Рассчитывают фактический КПД  $\eta_\phi$  по соотношению (3.30) ( $\eta_n$  берут из каталога).

Данные протокола № 4 позволяют также рассчитать  $V_{т\text{сбр}}$  по показаниям расходомера 11:

$$V_{т\text{сбр}} = \mu K_{11} \sqrt{(\rho_{u11'} - \rho_{u11''})/\rho g}.$$

Рассчитывают  $\eta_\phi$  по соотношению (3.30), подставляя в него  $V_{т\text{сбр}}$ , и сравнивают его с полученным графическим построением  $\eta_\phi^*$ , определяя абсолютное и относительное (в %) отклонения:

$$\Delta\eta_\phi = \eta_\phi^* - \eta_\phi; \quad \varepsilon = \Delta\eta_\phi/\eta_\phi \cdot 100.$$

Пытаются объяснить возможные расхождения в величинах  $\eta_\phi^*$  и  $\eta_\phi$ .

Оценка погрешности построенных характеристик. Погрешность кривой в координатах  $y=f(x)$  ( $y$  и  $x$  — результаты прямых измерений) оценивается так называемым эллипсом рассеивания для конкретных значений  $y$  и  $x$ . Характеристика  $H = f_1(V_t)$  будет иметь эллипсы рассеивания, оси которых будут соответствовать доверительным ошибкам  $e(H)$  и  $e(V_t)$  при заданной доверительной вероятности  $P$ . Пунктирные кривые, ограничивающие поле рассеивания, являются огибающими эллипсы рассеивания. При

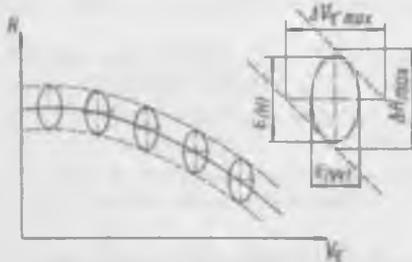


Рис. 3.13. Примерный вид поля доверительных ошибок характеристики  $H = f_1(V_t)$

детерминированной величине  $V_{\tau}$  максимальная погрешность величины полного напора несколько больше доверительной ошибки  $\Delta H_{\max} > \epsilon(H)$ , что видно из рисунка 3.13.

При отсутствии многократных повторностей измерения доверительную ошибку можно найти по приборным погрешностям с учетом соотношений (1.5) и (1.6) и закона накопления ошибок.

Расход

$$V_{\tau} = (\mu K)_{10} \sqrt{(p_{10'} - p_{10''}) / \rho g} = (\mu K)_{10} \sqrt{\Delta p_{10} / \rho g}.$$

Дисперсия  $S^2(\mu)$  найдена при выполнении работы № 15 [примем  $S^2(\mu) = \sigma^2$ ], дисперсию измерения давления можно оценить по классу точности манометров  $10'$ ,  $10''$  (см. рис. 3.10):

$$\sigma^2(p) = \Delta p_{\max}^2 / 3 = (kN / 100)^2 / 3,$$

где  $k$  — класс точности прибора;  $N$  — предел шкалы прибора.

Тогда в соответствии с законом накопления ошибок

$$\sigma^2(\Delta p) = 2\sigma^2(p) \text{ и } \sigma^2(V_{\tau}) = K_{10}^2 (\Delta p_{10} / \rho g) \sigma^2(\mu) + (\mu^2 K^2 / \rho g 2 \Delta p) \sigma^2(\Delta p).$$

Величина расхода не будет подчиняться нормальному закону распределения (см. главу 1), поэтому доверительную ошибку расхода определим в соответствии с неравенством Чебышева:

$$\epsilon(V_{\tau}) = 4.46\sigma(V_{\tau}).$$

Доверительную ошибку результатов измерения полного напора насоса получим, применив закон накопления ошибок к расчетному соотношению

$$H = \Delta z + \frac{p_{\text{нпз}} + (\pm p_{\text{вс}})}{\rho g} + \alpha \frac{v_{\text{нр}}^2 - v_{\text{вс}}^2}{2g};$$

$$S^2(H) = \left[ \frac{\partial H}{\partial(\Delta z)} \right]^2 S^2(\Delta z) + \left[ \frac{\partial H}{\partial(p_{\text{нпз}})} \right]^2 S^2(p) + \left[ \frac{\partial H}{\partial(p_{\text{вс}})} \right]^2 S^2(p) + \\ + \left[ \frac{\partial H}{\partial(v_{\text{нр}})} \right]^2 S^2(v_{\text{нр}}) + \left[ \frac{\partial H}{\partial(v_{\text{вс}})} \right]^2 S^2(v_{\text{вс}}).$$

Величину  $S^2(\Delta z) = \sigma^2(\Delta z) = \Delta z_{\max}^2 / 3$  следует принять, оценив  $\Delta z_{\max}$  с учетом применявшихся средств измерения длины при оценке взаимного расположения приборов 5 и 13 [например, если принять  $\Delta z_{\max} = 10^{-2}$  м, то  $\sigma^2(\Delta z) = 10^{-4} / 3$  м<sup>2</sup>].  $S^2(p) = \sigma^2(p)$  следует принять по классу точности приборов,  $S^2(v_{\text{вс}}) = S^2(v_{\text{нр}}) = \sigma^2(v) = \sigma^2(V_{\tau}) (16 / \pi^2 d^4)$ , если размеры площадей сечений всасывающей и нагнетательной коммуникаций принять за величины одинаковые и детерминированные. Тогда при  $d_{\text{нр}} \neq d_{\text{вс}}$

$$\sigma^2(H) = \sigma^2(\Delta z) + (1 / \rho g)^2 2\sigma^2(p) + \alpha^2 (16 / g^2 \pi^2) \sigma^2(V_{\tau}) [(v_{\text{нр}}^2 / d_{\text{нр}}^4) + (v_{\text{вс}}^2 / d_{\text{вс}}^4)].$$

Доверительную ошибку измерения полного напора примем по неравенству Чебышева:  $\epsilon(H) = 4,46\sigma(H)$ .

Для построения огибающих кривых можно взять пять разных подач  $V_r$  и соответствующие им  $H$ , рассчитать для этих значений  $\epsilon(H)$  и  $\epsilon(V_r)$  и произвести необходимые графические построения.

### Вопросы для самопроверки

1. Всегда ли при работе лопастного насоса требуемый напор равен развиваемому насосом?

2. При каких методах регулирования работы лопастного насоса изменяется характеристика насоса, характеристика сети?

3. Можно ли осуществить такой метод регулирования, при котором изменяются и характеристика насоса и характеристика сети?

4. Почему при снятии характеристики насоса  $H = f_1(V_r)$  расход изменяют, изменяя степень закрытия задвижки на нагнетательной коммуникации, а при снятии характеристики сети расход изменяют, изменяя частоту вращения?

5. В чем проявляется кавитация при работе лопастного насоса?

6. Почему кавитацию в насосах часто называют паровой?

7. Какие меры могут обеспечить бескавитационный режим работы насоса?

8. Почему при регулировании работы насоса дроссельным методом или сбросом части жидкости фактический КПД ниже паспортного, а при регулировании изменением частоты вращения равен паспортному, определяемому с помощью параболы подобных режимов?

9. Почему с увеличением продолжительности эксплуатации насоса характеристики его изменяются? Как изменяются?

### Список используемой литературы

Гидравлика, гидромашин и гидроприводы / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. — М.: Машиностроение, 1982. — 422 с.

Расчеты и задачи по процессам и аппаратам пищевых производств / С. М. Гребенюк, Н. С. Михеева, Ю. П. Грачев и др. — М.: Агропромиздат, 1987. — 304 с.

Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я. М. Вильнер, Я. Т. Ковалев, Б. Б. Некрасов. — Минск: Высшая школа, 1976. — 414 с.

Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами РД 50213—80. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 319 с.

## ПРОЦЕСС ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Перемешивание широко применяется в пищевой технологии для получения эмульсий, суспензий и смесей твердых компонентов, а также для интенсификации тепло- и массообменных и биохимических процессов. В зависимости от агрегатного состояния перемешиваемых компонентов и технологического назначения полученной массы выбирают метод (механический, пневматический, ультразвуковой и т. д.) и конструкцию аппарата.

Наиболее распространенным способом перемешивания жидких и пастообразных сред является механический в аппаратах,

называемых мешалками. В зависимости от устройства рабочих органов мешалки делятся на лопастные, пропеллерные, турбинные и специального назначения.

Процесс перемешивания с гидродинамической точки зрения может быть рассмотрен как процесс внешнего обтекания тел потоком жидкости. В соответствии с этим при вращении рабочего органа мешалки энергия затрачивается на преодоление трения лопастей о жидкость и на вихреобразование. Для описания процессов перемешивания при установившемся режиме используют общее критериальное уравнение, связывающее физические характеристики движения жидкости:

$$Eu_m = f(Re_m, Fr_m, \Gamma_1, \Gamma_2), \quad (3.31)$$

где  $Eu_m = N/\rho n^3 d^5$  — обобщенная переменная (число Эйлера);  $Re_m = nd^2\rho/\mu$  — критерий Рейнольдса;  $Fr_m = n^2 d/g$  — критерий Фруда;  $\Gamma_1, \Gamma_2$  — симплексы геометрического подобия;  $N$  — мощность на валу мешалки, Вт;  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $n$  — частота вращения рабочего органа мешалки, с<sup>-1</sup>;  $d$  — диаметр рабочего органа мешалки, м;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Действительную линейную скорость перемешивания жидкости определить сложно и вместо нее используют эквивалентную величину — частоту вращения рабочего органа мешалки, а потерю давления характеризуют величиной потребляемой энергии.

Рабочий орган мешалки обычно погружен в жидкость на достаточную глубину, поэтому гидравлическое сопротивление в основном обусловлено силой трения, а влиянием силы тяжести можно пренебречь, т. е. из уравнения следует исключить критерий Фруда. Тогда согласно уравнению (3.31):

$$N/\rho n^3 d^5 = f(nd^2\rho/\mu). \quad (3.32)$$

Это уравнение можно представить в виде степенной функции:

$$Eu_m = A Re_m^m, \quad (3.33)$$

где  $A$  и  $m$  — постоянные, определяемые опытным путем.

На основании экспериментальных исследований определяют энергию, потребляемую мешалкой за время ее работы.

#### Работа № 18. ИСПЫТАНИЕ ЛОПАСТНОЙ МЕШАЛКИ

Наиболее широко в пищевой технологии применяются лопастные, пропеллерные и турбинные мешалки, имеющие сравнительно простую конструкцию. Важной характеристикой работы мешалок является расход энергии, который может быть опреде-

лен экспериментально. Для обработки экспериментальных данных целесообразно применить теорию подобия и установить зависимость числа  $E_{и}$  от режима процесса.

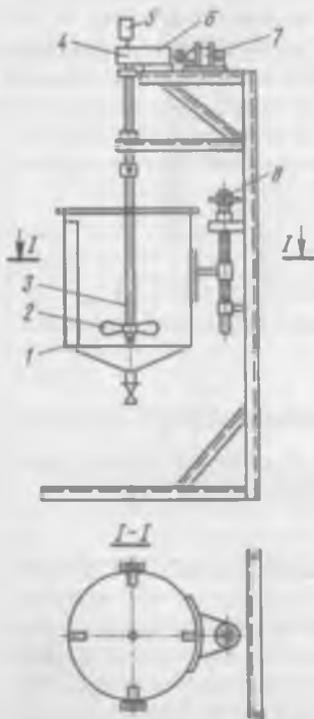
### Цель работы

1. Практическое ознакомление с работой мешалок.
2. Изучение основных конструктивных элементов мешалок.
3. Обобщение экспериментальных данных испытания мешалок.
4. Расчет расхода энергии, затрачиваемой на перемешивание.

### Описание экспериментальной установки

Испытание проводят на экспериментальной установке (рис. 3.14). В цилиндрическом сосуде 1 вращается рабочий орган 2 (лопасть), укрепленный на вертикальном валу 3. Движение вертикальному валу передается через редуктор 4 и вариатор скоростей 6 от электродвигателя 7. При помощи вариатора скоростей изменяется частота вращения рабочего органа.

Требуемая для перемешивания жидких сред мощность измеряется самопишущим ваттметром, включенным в электрическую схему электродвигателя постоянного тока. Частота вращения рабочего органа измеряется при помощи тахогенератора 5 с выходом на вторичный регистрирующий прибор (таховольтметр).



### Методика проведения испытания

Перед началом испытаний знакомятся с основными параметрами установки и жидкости, к которым относятся диаметр сосуда  $D$ , высота слоя жидкости  $H$ , плотность жидкости  $\rho$ , температура жидкости  $t$ , динамический коэффициент

Рис. 3.14. Схема установки для испытания лопастной мешалки:  
1 — сосуд; 2 — лопасть; 3 — вал; 4 — редуктор; 5 — тахогенератор; 6 — вариатор скоростей; 7 — электродвигатель; 8 — винт

вязкости  $\mu$ , диаметр окружности вращения лопастей  $d$ , ширина лопасти  $b$ , число лопастей  $x$ .

Испытание лопастной мешалки начинают с проверки работы контрольно-измерительной аппаратуры (тахогенератора и самопишущего ваттметра). Затем измеряют потребляемую энергию при работе мешалки на холостом ходу при заданных частотах вращения рабочего органа. Далее жидкостью из мерного сосуда заполняют сосуд  $1$  и определяют ее температуру. При помощи винта  $8$  сосуд  $1$  перемещают вверх до полного погружения рабочего органа в жидкость. После этого включают электродвигатель мешалки и проводят замеры показаний при тех же частотах вращения, что и на холостом ходу. Необходимо провести пять опытов при разной частоте вращения мешалки. Результаты испытаний заносят в протокол № 1.

### Протокол № 1

Мощность	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>			
При холостом ходе $N_0$				
При перемешивании жидкости $N_p$				
Полезная $N_u$				

### Обработка результатов испытания

Расчетная критериальная зависимость для процесса перемешивания определяется уравнением (3.33). Значения  $Eu_u$  и  $Re_u$  рассчитывают по формулам

$$Eu_u = N / \rho n^3 d^5; \quad Re_u = nd^2 \rho / \mu. \quad (3.34)$$

На основании вычисленных значений  $Eu_u$  и  $Re_u$  строят график зависимости  $\lg Eu_u$  от  $\lg Re_u$  (рис. 3.15) и по нему определяют значения постоянных величин  $A$  и  $m$ , входящих в формулу (3.33). Логарифмируя зависимость (3.33), получают уравнение прямой линии

$$\lg Eu_u = \lg A + m \lg Re_u. \quad (3.35)$$

Показатель степени  $m$  находят как тангенс угла наклона полученной прямой  $\operatorname{tg} \alpha = ab/bc$ . Так как

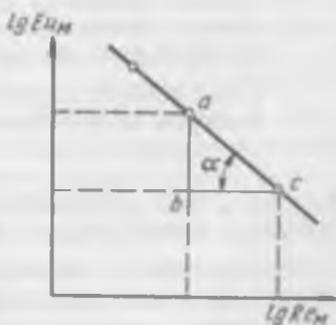


Рис. 3.15. График зависимости  $\lg Eu_u = f(\lg Re_u)$

угол  $\alpha$  расположен во второй четверти, то его величина будет отрицательной.

Постоянную  $A$  находят как отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат, или из уравнения

$$\lg A = \lg E u_n - m \lg R e_n. \quad (3.36)$$

Необходимо сделать не менее трех таких определений и получить из них среднее значение коэффициентов.

Мощность на валу мешалки

$$N_n = N_1 \eta_{дв} \eta_{пер}, \quad (3.37)$$

где  $N_1$  — мощность, определяемая по ваттметру;  $\eta_{дв}$  — КПД электродвигателя;  $\eta_{пер}$  — КПД передачи.

Примечание. Значение  $\eta_{дв}$  выбирают в зависимости от типа электродвигателя и передачи. Для установки, изображенной на рис. 3.14,  $\eta_{дв} = 0,8$ ;  $\eta_{пер} = 0,85$ .

Данные экспериментов и расчетов вносят в протокол № 2, после чего проводят анализ зависимости расхода энергии от частоты вращения рабочего органа.

#### Протокол № 2

№ опыта	Частота вращения рабочего органа мешалки	КПД передачи $\eta_{пер}$	КПД электродвигателя $\eta_{дв}$	Мощность по ваттметру $N_1$	Мощность на валу рабочего органа $N_n$	$E u_n$	$\lg E u_n$	$R e_n$	$\lg R e_n$	$m$	$\lg A$	$A$

#### Вопросы для самопроверки\*

1. Поясните назначение процесса перемешивания.
2. Какие вы знаете типы мешалок?
3. Поясните методику расчета с использованием общего критериального уравнения.
4. Какие факторы влияют на расход энергии при перемешивании?
5. Разберите порядок проведения работы и проанализируйте опытные данные.

#### Работа № 19. ИССЛЕДОВАНИЕ ПСЕВДООЖИВЕННОГО СЛОЯ ТВЕРДОГО ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА

За последние годы широкое применение в промышленности нашли процессы взаимодействия газов и жидкостей с твердыми зернистыми материалами. При проведении этих процессов твер-

\* См. Брагинский Л. Н., Бегачев В. И., Барабаш В. М. Перемешивание жидких сред. Л., 1984. — 336 с.

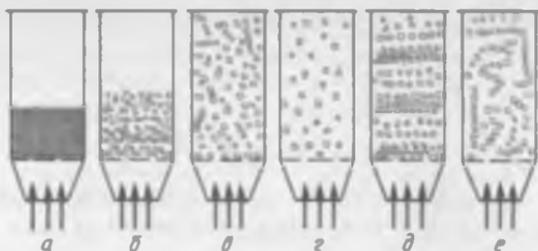


Рис. 3.16. Состояние слоя зернистого материала при разных режимах:

а — неподвижный слой (режим фильтрования); б — однородный псевдооживленный слой при  $v > v_{\text{кр}}$ ; в — неоднородный псевдооживленный слой; г — унос твердых частиц; д — псевдооживленный слой с поршнеобразованием; е — псевдооживленный слой с каналобразованием

дые частицы приобретают подвижность относительно одна другой за счет обмена энергией с взвешивающим потоком. Такое состояние зернистого материала получило название псевдооживленный слой из-за внешнего сходства с поведением обычной капельной жидкости: псевдооживленный слой принимает форму вмещающего его аппарата, поверхность псевдооживленного слоя (без учета всплесков) — горизонтальная. Одновременно обнаруживаются и другие свойства, аналогичные свойствам жидкости, — текучесть и поверхностное натяжение. Тела, имеющие меньшую плотность, чем псевдооживленный слой, всплывают в нем, а большую — тонут.

Широкое внедрение техники псевдооживления в промышленную практику обусловлено рядом преимуществ. Так, твердый зернистый материал можно перемещать по трубам, что позволяет многие периодические процессы осуществлять непрерывно. Особенно выгодно применять псевдооживленный слой для процессов, скорость которых определяется термическим или диффузионным сопротивлением в газовой фазе. Эти сопротивления в условиях псевдооживления уменьшаются в десятки, а иногда в сотни раз, а скорость процессов соответственно увеличивается. Благодаря интенсивному перемешиванию твердых частиц в псевдооживленном слое практически выравнивается поле температур, устраняется возможность значительных локальных перегревов и связанных с этим нарушений в ходе ряда технологических процессов. Наряду с достоинствами псевдооживленному слою свойственны и некоторые недостатки. Так, вызванное интенсивным перемешиванием твердых частиц выравнивание температур и концентраций в слое приводит к уменьшению движущей силы процесса. Возможность проскока значительных количеств газа без достаточного контакта с твердым зернистым материалом также снижает выход целевого продукта. Отрицательным следует считать износ самих твердых частиц, эрозию аппаратуры,

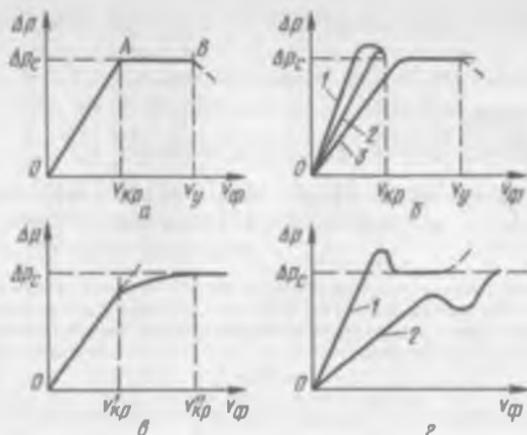


Рис. 3.17. Кривые псевдооживления: а — идеальная; б — реальная; в — полидисперсного материала; з — слой с поршнеобразованием и каналообразованием

возникновение значительных зарядов статического электричества, необходимость установки мощных газоочистительных устройств.

Гидродинамическая сущность процесса псевдооживления заключается в следующем. Если через слой зернистого материала, расположенного на поддерживающей перфорированной решетке аппарата, проходит поток псевдооживляющего газа, то состояние слоя зернистого материала оказывается разным (рис. 3.16) в зависимости от скорости этого потока. При плавном увеличении скорости потока от 0 до некоторого первого критического значения происходит обычный процесс фильтрования, при котором твердые частицы неподвижны.

На графике процесса псевдооживления (рис. 3.17, а), выражающем зависимость перепада статического давления в слое зернистого материала от скорости фильтрования псевдооживляющего агента, процессу фильтрования соответствует восходящая ветвь  $OA$ . В случае малого размера частиц и невысоких скоростей фильтрования псевдооживляющего агента режим движения последнего в слое материала ламинарный и ветвь  $OA$  прямолинейна (см. рис. 3.17, а). В слое крупных частиц при достаточно высоких скоростях псевдооживляющего агента перепад давления может расти нелинейно с увеличением скорости (переходный и турбулентный режимы).

Переход от режима фильтрования к состоянию псевдооживления соответствует на кривой псевдооживления критической скорости псевдооживляющего агента  $v_{\text{кр}}$  (точка  $A$ ), называемой

скоростью начала псевдооживления. В момент начала псевдооживления вес зернистого материала  $G_c$ , приходящийся на единицу площади поперечного сечения аппарата  $f$ , уравнивается силой гидравлического сопротивления слоя:

$$\Delta p_c = G_c / f. \quad (3.38)$$

С учетом архимедовых сил, действующих на частицы слоя, выражение для  $\Delta p_c$  можно представить в виде:

$$\Delta p_c = (\rho - \rho_s)g(1 - \varepsilon_0)h_0, \quad (3.39)$$

где  $\rho$  и  $\rho_s$  — плотность твердых частиц и псевдооживляющего агента;  $h_0$  — высота неподвижного слоя;  $\varepsilon_0$  — порозность неподвижного слоя, т. е. относительный объем пустот в неподвижном слое.

$$\varepsilon_0 = \frac{V_0 - V}{V} = 1 - \rho / \rho_0, \quad (3.40)$$

$V_0$  и  $V$  — объем неподвижного слоя и объем частиц;  $\rho_0$  — плотность материала.

Начиная со скорости  $v_{кр}$  в начале псевдооживления и выше, сопротивление слоя сохраняет практически постоянное значение и зависимость  $\Delta p_c = f(v_\phi)$  выражается прямой  $AB$ , параллельной оси абсцисс. Это объясняется тем, что с ростом скорости псевдооживляющего агента контакт между частицами уменьшается и они получают большую возможность хаотического перемещения по всем направлениям. При этом возрастает среднее расстояние (просветы) между частицами, т. е. увеличивается порозность слоя  $\varepsilon$  и, следовательно, его высота  $h$ . Так как перепад давления в псевдооживленном слое  $\Delta p_c$  практически остается постоянным, высоту такого расширившегося слоя можно определить из условия:

$$\Delta p_c = (\rho - \rho_s)g(1 - \varepsilon_0)h_0 = (\rho - \rho_s)g(1 - \varepsilon)h, \quad (3.41)$$

откуда

$$h = \frac{(1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon)} h_0. \quad (3.42)$$

В зависимости от свойств псевдооживляющего потока и его скорости можно наблюдать несколько стадий процесса псевдооживления. При скорости псевдооживляющего агента, незначительно превышающей  $v_{кр}$ , т. е. при  $v \geq v_{кр}$ , наблюдается однородное («спокойное») псевдооживление (рис. 3.17, б). По мере роста скорости при псевдооживлении газом в слое возникают компактные массы газа («пузыри», «каверны»), интенсивно турбулизирующие твердые частицы и образующие всплески зернистого материала на поверхности. При этом наблюдаются значительные пульсации статического и динамического напоров псевдооживляющего агента. Такой характер гидродинамики слоя

называется неоднородным псевдоожигением (рис. 3.17, *з*). Наконец, при достижении некоторого второго критического значения скорости  $v$ , называемой скоростью уноса, твердые частицы начинают выноситься из слоя (см. рис. 3.16, *з*) и их количество в аппарате уменьшается. Порозность такого слоя стремится к 1, и сопротивление слоя правее точки  $B$  (см. рис. 3.17, *а*) также падает. Кривая  $OAB$  называется кривой идеального псевдоожигения.

На практике действительная кривая псевдоожигения (см. рис. 3.17, *б*) отличается от идеальной кривой. Крутизна восходящей ветви реальной кривой псевдоожигения определяется плотностью первоначальной упаковки (засыпки) твердых частиц: при более плотной упаковке сопротивление слоя несколько выше и восходящая ветвь идет круче (кривая 1), при более рыхлой — полого (кривая 2). В момент перехода слоя в псевдоожигенное состояние наблюдается пик давления, обусловленный необходимостью затраты дополнительной энергии на преодоление сил сцепления. Величина пика давления определяется плотностью первоначальной упаковки частиц, их формой и состоянием их поверхности.

При постепенном уменьшении скорости псевдоожигающего агента и переходе слоя от псевдоожигенного состояния к плотному кривая 3 располагается ниже кривых 1 и 2 (см. рис. 3.17, *б*), что соответствует более рыхлой структуре плотного слоя для этого случая. Для полидисперсных материалов, как правило, наблюдается переходный диапазон скоростей между режимами фильтрования и псевдоожигения (см. рис. 3.17, *в*). Вначале при некоторой скорости  $v'_{кр}$  приходят в движение наиболее мелкие частицы. По мере приближения к скорости  $v''_{кр}$  все большая доля частиц взвешивается и наступает полное псевдоожигение.

В реальных условиях поведение слоя во многом зависит от конструктивных особенностей аппаратов. Так, в аппаратах с большим отношением  $h/D$  (т. е. в узких и высоких аппаратах) пузыри газа, сливаясь по мере подъема, могут образовать сплошные газовые «пробки», перемещающиеся движущимися «поршнями» псевдоожигенного зернистого материала (см. рис. 3.16, *д*). Сопротивление слоя при этом начинает превышать расчетную величину  $\Delta p_c$  (см. рис. 3.17, *з*, кривая 1).

Напротив, при малых отношениях  $h/D$  и наибольших скоростях псевдоожигающего агента в аппаратах с перфорированными газораспределительными решетками могут возникать сквозные каналы, по которым устремляется основная часть газового потока — слой с каналобразованием (см. рис. 3.16, *е*). При этом в зернистом материале образуются застойные зоны и общее сопротивление слоя оказывается меньше его веса, т. е. меньше расчетной величины (см. рис. 3.17, *з*, кривая 2).

Для характеристики интенсивности перемешивания частиц в кипящем слое используется число псевдооживления

$$N = v_{\phi} / v_{кр}, \quad (3.43)$$

где  $v_{\phi}$  — фактическая скорость фильтрования воздуха;  $v_{кр}$  — критическая скорость фильтрования воздуха, обуславливающая переход сыпучего материала в состояние кипения.

## Цель работы

1. Экспериментальное определение времени нагрева частиц в псевдооживленном и плотном слоях.
2. Определение основных гидродинамических характеристик псевдооживленного слоя (скорость фильтрования, гидродинамическое сопротивление, порозность).
3. Аналитическое определение продолжительности нагрева частиц псевдооживленного слоя.

## Описание экспериментальной установки

Установка (рис. 3.18) состоит из стеклянной трубы 4 внутренним диаметром 100 мм, в которую вставлено сито 2 с мелкоперфорированной ячейкой. На сито помещают слой сыпучего продукта 3 определенной первоначальной высоты, которая измеряется линейкой 6. Для подогрева продукта до заданной температуры используют горячий воздух, который продувают через слой продукта феном 9 с электронагревателем 10.

При продувании через слой продукта воздуха с определенной скоростью происходит псевдооживление слоя, т. е. слой переходит во взвешенное состояние. Для определения температуры продукта в середине слоя помещен стеклянный термометр 7. Температура горячего воздуха до слоя определяется термометром 1, после слоя — термометром 5. Перепад давления в слое определяют U-образным манометром 8. Скорость возду-

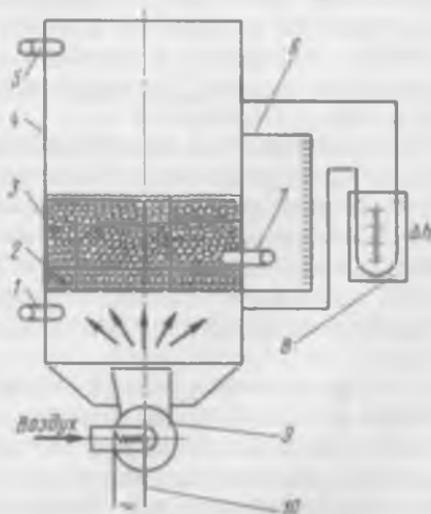


Рис. 3.18. Схема установки для исследования псевдооживленного слоя:

1, 5, 7 — термометры; 2 — сито; 3 — слой продукта; 4 — труба; 6 — линейка; 8 — манометр; 9 — фен; 10 — электронагреватель.

ха в трубе определяют при помощи чашечного анемометра. При подогреве плотного слоя продукта при таком же расходе воздуха, как и при псевдоожигении, на слой сверху накладывают металлический перфорированный диск, который не позволяет слою переходить во взвешенное состояние.

### Методика проведения испытания

Перед началом испытания в протокол вносят исходные данные материала: масса  $m$ , плотность  $\rho$ , средний диаметр частиц  $d_s$ , коэффициент сферичности частиц  $\psi$ , внутренний диаметр трубы  $d_{\text{вн}}$ . После этого приступают к подготовке установки к пуску. Для этого в стеклянную трубу по указанию преподавателя засыпают определенную порцию сыпучего материала (предварительно взвешенную) и разравнивают слой по сечению трубы. Включают электрический фен и устанавливают заданную скорость воздуха, соответствующую режиму псевдоожигения. Скорость воздуха, соответствующая началу псевдоожигения, может быть подсчитана по формуле Лева

$$v_{\text{кр}} = 9,35 \cdot 10^{-3} (d_s^{1,82} / \nu^{0,88}) \left( \frac{p_{\text{тв}} - p_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} \right)^{0,94}, \quad (3.44)$$

где  $d_s$  — средний диаметр частиц, форму которых принимают шарообразной, м;  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости воздуха (определяют по средней температуре воздуха, см. приложение 6),  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $p_{\text{тв}}$  — плотность твердых частиц,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{в}}$  — плотность воздуха (определяют по средней температуре воздуха, см. приложение 6),  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Когда температура воздуха на входе в слой установится постоянной, включают секундомер и в протокол № 1 испытания записывают начальную и конечную температуру воздуха, температуру материала в середине слоя, скорость воздуха, перепад давления в слое. Последующие замеры проводят с интервалом в 5 мин в течение 0,5 ч.

Подогреватель воздуха выключают и слой материала охлаждают до первоначальной температуры. Затем на слой материала сверху накладывают металлический перфорированный диск. При постоянном расходе воздуха включают подогреватель воздуха и, как только начальная температура воздуха установится постоянной, производят запись в протокол № 1 указанных выше величин. Последующие замеры проводят с интервалом в 5 мин в течение 0,5 ч.

Подогреватель воздуха выключают и слой материала охлаждают до температуры в помещении. При разных скоростях движения воздуха (для шести значений) без его подогрева определяют перепады давления по U-образному манометру. Данные измерения заносят в протокол № 1.

Состояние материала	№ п/п	Продолжительность нагревания $t$ , с	Расход воздуха $G_a$ , м <sup>3</sup> /с	Скорость фильтрации $v_\phi$ , м/с	Температура воздуха, °С		Температура материала, °С		Перепад давления $\Delta h_0$ , мм вод. ст.	Высота слоя продукта $h$ , м
					начальная $t_0$	конечная $t$	начальная $\theta_0$	конечная $\theta$		
Псевдооживленный слой	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
Плотный слой	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
Перепад давления на перегородке и в слое	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									

### Обработка результатов испытания

Скорость движения воздуха (в м/с)

$$v_a = 4G_a / \pi d_{вн}^2 \quad (3.45)$$

где  $G_a$  — расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $d_{вн}$  — внутренний диаметр трубы аппарата, м.

По данным протокола № 1 в координатах  $t$ — $\tau$  строят график изменения температуры материала псевдооживленного и плотного слоев в зависимости от продолжительности нагревания.

Для каждой скорости фильтрации определяют значения гидродинамического сопротивления пористой перегородки после удаления с нее слоя зернистого материала. Результаты измерений заносят в протокол № 2. По полученным результатам строят график зависимости  $\Delta p_n = f(v_\phi)$ . Далее определяют гидродинамическое сопротивление пористой перегородки, соответствующее скорости фильтрации, при которой проводилось псевдооживление исследуемого слоя продукта. Величину сопротивления пористой перегородки в этом случае находят по графику  $\Delta p_n = f(v_\phi)$ .

Протокол № 2

№ п/п	Расход воздуха $G_0$ , м <sup>3</sup> /с	Скорость фильтрования $v_\phi$ , м/с	Сопротивление перегородки $\Delta h_n$ , мм вод. ст.
1			
2			
3			
4			
5			
6			

По результатам измерений (протоколы № 1 и 2) рассчитывают величину кажущегося гидродинамического сопротивления:

$$\Delta p_c = \Delta p_0 - \Delta p_n.$$

По полученным данным строят график  $\Delta p_c = f(v_\phi)$ .

Порозность псевдооживленного слоя определяют по формуле (3.40), высоту слоя продукта — по формуле (3.42), число псевдооживленного — по формуле (3.43) и теоретическую величину гидродинамического сопротивления кипящего слоя — по формуле (3.39) при разных скоростях фильтрования. Результаты расчетов  $\epsilon$ ,  $N$ ,  $\Delta p_c$  сводят в протокол № 3. Находят процент расхождения между опытными и расчетными значениями  $\Delta p_c$ .

Протокол № 3

№ п/п	Скорость фильтрования $v_\phi$ , м/с	Высота слоя продукта $h$ , м	Объем слоя $V_0 = fh$ , м <sup>3</sup>	Плотность ре. кг/м <sup>3</sup>	Порозность $\epsilon$	Число псевдооживления $N$
1						
2						
3						
4						
5						
6						

**Аналитическое определение продолжительности нагревания частиц псевдооживленного слоя**

Для получения зависимости температуры твердых частиц  $t$  от продолжительности нагревания  $\tau$  полагаем, что благодаря перемешиванию температура воздуха и твердых частиц, образующих псевдооживленный слой, выравнивается. Тогда, если предположить, что теплопроводность твердых частиц достаточно велика, а потерями теплоты можно пренебречь, то количество переданной теплоты за время  $d\tau$  составит:

$$dQ = \alpha S(t - \theta)d\tau, \quad (3.46)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от воздуха к частице, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S$  — площадь общей поверхности контакта между газом и частицами, м<sup>2</sup>;  $t$  — температура воздуха, равная благодаря его интенсивному перемешиванию температуре на выходе, °С;  $\theta$  — температура твердых частиц, °С.

Количество теплоты, отдаваемой воздухом,

$$dQ = G_0 c_a (t_0 - t) d\tau, \quad (3.47)$$

где  $G_0$  — расход воздуха, кг/с;  $c_a$  — удельная теплоемкость воздуха (определяют по средней температуре воздуха, см. приложение 6), Дж/(кг·К);  $t_0$  — начальная температура горячего воздуха, °С.

Количество теплоты, воспринимаемой частицами,

$$dQ = mc_0 d\theta, \quad (3.48)$$

где  $m$  — масса частиц материала, кг;  $c_0$  — удельная теплоемкость твердых частиц, Дж/(кг·К).

Тепловой баланс выражается равенствами

$$\alpha S(t - \theta)d\tau = G_0 c_a (t_0 - t)d\tau = mc_0 d\theta, \quad (3.49)$$

откуда

$$\frac{\alpha S}{mc_0} d\tau = \frac{dQ}{t_0 + \alpha S / (G_0 c_a) - \theta} = [1 + \alpha S / (G_0 c_a)] d\theta / (t_0 - \theta).$$

Интегрируя в пределах от  $\theta_0$  до  $\theta$  и от 0 до  $\tau$ , получим выражение для продолжительности нагревания:

$$\tau = \frac{mc_0}{\alpha S} \left( 1 + \frac{\alpha S}{G_0 c_a} \right) 2.3 \lg \frac{t_0 - \theta_0}{t_0 - \theta}. \quad (3.50)$$

Расход воздуха

$$G_0 = (\pi d_{\text{ст}}^2 / 4) v_{\text{ст}} \rho_a, \quad (3.51)$$

где  $\rho_a$  — плотность воздуха при средней температуре, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu \lambda / d_ч, \quad (3.52)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности воздуха при средней температуре, Вт/(м·К).

$$Nu = 0,426 Re^{0.3} Pr^{1/3} Ar^{0.17} \text{ при } Re \text{ Ar}^{0.4} < 2,15;$$

$$Nu = 0,943 Re^{-1} Pr^{1/3} Ar^{0.69} \text{ при } Re \text{ Ar}^{0.4} > 2,15,$$

здесь  $Ar = \frac{d^2 g (\rho - \rho_a)}{\nu \rho_a}$ ;  $Re = v d_ч / \nu$ ;  $Pr = \mu c_ч / \lambda$ ;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости воздуха (определяется по средней температуре), Па·с.

Площадь поверхности контакта фаз

$$S = \frac{m}{\frac{\pi}{6} d_ч^3} \cdot \frac{\pi}{4} d_ч^2 \frac{1}{\psi} = 3m / (2d_ч \rho \psi), \quad (3.53)$$

где  $\psi$  — коэффициент сферичности частиц.

Подставляя числовые значения величин в уравнение (3.50), получим время, необходимое для нагревания частиц псевдоожигенного слоя. Полученное значение времени сравниваем с найденным экспериментально.

#### Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под псевдоожигением?
2. Какое состояние псевдоожигения называют «кипящим слоем»?
3. Дать характеристику различных стадий псевдоожигения.
4. Что такое скорость фильтрования и критическая скорость фильтрования?
5. Как изменяется гидродинамическое сопротивление псевдоожигенного слоя с увеличением скорости фильтрования?
6. Какая зависимость существует между порозностью псевдоожигенного слоя и числом псевдоожигений?
7. Как влияет псевдоожигение на интенсивность процесса нагревания сыпучего материала?

#### Список рекомендуемой литературы

- Плановский А. Н., Николаев П. И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. — М.: Химия, 1972. — 496 с.
- Стабников В. Н., Лысянский В. М., Попов В. Д. Процессы и аппараты пищевых производств. — М.: Агропромиздат, 1985. — 503 с.

## ПРОЦЕССЫ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

При проведении ряда технологических процессов в пищевой промышленности широко используют разные методы разделения неоднородных систем. Неоднородные системы представляют собой газообразную или жидкую дисперсионную среду, в которой во взвешенном состоянии находятся твердые или жидкие частицы (дисперсная фаза).

К неоднородным газовым системам относятся:

пыли ( $G+T$ ), состоящие из газа и распределенных в нем твердых частиц (3—50 мкм), образующиеся в результате дробления, измельчения или истирания материалов;

дымы ( $G+T$ ), состоящие из газа и мелких твердых частиц (0,3—0,5 мкм), образующиеся в результате сгорания топлива;

туманы ( $G+Ж$ ), состоящие из газа и находящихся в нем капель жидкости (0,3—3 мкм), образующихся в результате конденсации.

К неоднородным жидким системам относятся:

суспензии ( $Ж+T$ ), состоящие из жидкости и взвешенных мелких твердых частиц; суспензии в зависимости от находящихся в них твердых частиц разделяют на грубые (100 мкм), тонкие (0,1—100 мкм) и коллоидные системы — мути (размер частиц меньше 0,1 мкм);

эмульсии (Ж+Ж), состоящие из жидкости и находящихся в ней капле другой, не растворяющейся в ней жидкости; величина частиц дисперсной фазы для эмульсий колеблется в широких пределах;

пены (Ж+Г), состоящие из жидкости и находящихся в ней пузырьков газа.

Очистка газов и разделение неоднородных жидких систем обычно осуществляются путем использования силы тяжести, центробежных сил инерции и напора, создаваемого по сторонам фильтрующей перегородки. Для разделения и очистки неоднородных газовых и жидких систем используют специальные аппараты: пылесадительные камеры, циклоны, гидравлические пылеуловители, фильтры, отстойники, гидроциклоны, центрифуги, сепараторы и др. Теория расчета этих аппаратов основывается на закономерностях процессов осаждения и фильтрования.

Осаждение является типичным гидравлическим процессом. На частицу, движущуюся под влиянием силы тяжести, действуют следующие силы:

сила тяжести, которая определяется как масса частицы в газовой среде (с учетом закона Архимеда):

$$G = (\pi d^3/6)(\rho_1 - \rho_2)g, \quad (3.54)$$

где  $d$  — диаметр частиц, м;  $\rho_1$  — плотность взвешенной частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2$  — плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

сила сопротивления среды, которая рассчитывается в зависимости от режима движения; при  $Re < 0,2$  применим закон Стокса:

$$S = 3\pi d\mu v_0, \quad (3.55)$$

где  $3\pi = \psi Re$  ( $\psi$  — коэффициент сопротивления среды по Лященко);  $d$  — диаметр частиц, м;  $\mu$  — вязкость среды, Па·с;  $v_0$  — скорость равномерного осаждения частиц, м/с.

При достижении частицей постоянной скорости осаждения  $S = G$ . Тогда

$$3\pi d\mu v_0 = (\pi d^3/6)(\rho_1 - \rho_2)g,$$

откуда

$$v_0 = d^2(\rho_1 - \rho_2)g/18\mu. \quad (3.56)$$

При  $Re > 0,2$  скорость осаждения рассчитывают по общему закону Ньютона:

$$S = \epsilon F \rho_2 (v_0^2/2), \quad (3.57)$$

где  $\epsilon$  — коэффициент сопротивления среды, являющийся функцией критерия  $Re$  (определяется опытным путем);  $F = \pi d^2/4$  — площадь Миделева сечения частицы (условно частицы считают шарообразными), м<sup>2</sup>.

Исходя из равенства  $S = G$ , получаем:

$$v_0 = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{gd}{\epsilon} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1}} \quad (3.58)$$

При осаждении частицы в циклоне на нее действует центробежная сила:

$$C = mv^2/R, \quad (3.59)$$

где  $m$  — масса частицы, кг;  $v$  — окружная скорость частицы, м/с;  $R$  — расстояние от оси вращения до частицы, м.

Важной величиной, характеризующей интенсивность разделения за счет центробежной силы, является отношение ускорения центробежной силы к ускорению свободного падения, называемое фактором разделения:

$$\Phi = v^2/Rg, \quad (3.60)$$

где  $v^2/R$  — ускорение центробежной силы, м/с<sup>2</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Скорость осаждения частиц под действием центробежной силы значительно больше, чем в отстойных камерах.

Аналогично методу определения  $v_0$  в отстойных камерах можно записать  $S = C$ . Тогда, исходя из закона Стокса (при  $Re < 0,2$ ), получим:

$$v_0 = [d^2(\rho_1 - \rho_2)v^2]/18\mu R. \quad (3.61)$$

Ориентируясь на осаждение самых мелких частиц (в циклоне  $d \leq 5$  мкм) скорость осаждения рассчитывают по формуле (3.61) для ламинарного режима.

#### Работа № 20. ИСПЫТАНИЕ ЦИКЛОНА

Очистку газов под действием центробежной силы применяют для увеличения скорости осаждения и более полного выделения из газа твердых взвешенных частиц. Для этого используют аппараты, называемые циклонами.

Газ поступает на очистку в циклон через патрубок, тангенциально приваренный к цилиндрической части аппарата, благодаря чему он совершает вращательное движение вокруг выхлопной трубы внутри циклона. Под действием центробежной силы, возникающей при вращении газа, твердые частицы, обладающие большей массой, отбрасываются от центра к стенке цилиндрической части и осаждаются на ней, затем сползают в коническую часть и удаляются из аппарата. Очищенный газ через выхлопную трубу поступает в производство или выбрасывается в атмосферу.

Значение центробежной силы определяют из формулы (3.59), фактор разделения рассчитывают по формуле (3.60), скорость осаждения — по формуле (3.61).

Если через  $C_1$  обозначить начальную и через  $C_2$  — конечную концентрацию пыли, то условный КПД циклона, характеризующий степень очистки газа,

$$\eta = (C_1 - C_2) / C_1. \quad (3.62)$$

### Цель работы

1. Изучение конструкции циклона.
2. Экспериментальное определение показателей его работы (КПД, фактор разделения и др.).

### Описание экспериментальной установки

Испытание циклона проводят на экспериментальной установке (рис. 3.19).

Для получения запыленного газа определенной концентрации в воздушный поток подают пыль (мучная пыль, сахарная пудра и т. д.). В камеру центробежным вентилятором 4 подают воздух и через форсунку 3 — пыль. Начальную концентрацию пыли можно установить по количеству подаваемой пыли. Из камеры запыленный воздух попадает в циклон 2, где очищается от пыли и через выхлопную трубу направляется в фильтр 1 для окончательной очистки, после чего выбрасывается в атмосферу.

### Методика проведения испытания

Скорость воздуха регулируют путем изменения живого сечения запорного устройства. При определенном его положении подают известный объем во входной патрубке циклона. Начальную концентрацию пыли  $C_1$  задают постоянной, регулируя зазор в проходном отверстии форсунки 3. В бункер засыпают распыляемый материал и через форсунку вводят его в поток воздуха, подаваемого вентилятором в циклон.

Пыль, выносимая из циклона, окончательно осаждается в тканевом фильтре, собирается и взвешивается для определения ко-

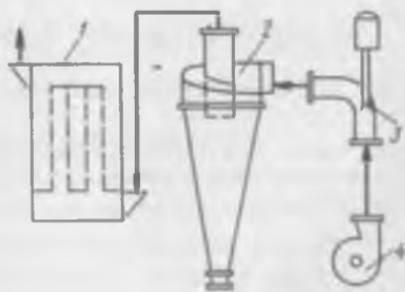


Рис. 3.19. Схема экспериментальной установки для испытания циклона: 1 — фильтр; 2 — циклон, 3 — форсунка; 4 — вентилятор

нечной концентрации  $C_2$ . Через разгрузочное отверстие циклона отбирают осевшую в циклоне пыль и также взвешивают. Размером частиц задаются. Вязкость газа (воздуха) находят в зависимости от его температуры из приложения 6.

### Обработка результатов испытания

По результатам испытания (см. протокол), зная начальную  $C_1$  и конечную  $C_2$  концентрацию пыли, можно определить КПД циклона по формуле (3.62).

Обычно количество пыли, находящейся в воздухе, определяют весовым методом путем просасывания его через фильтр из хлопчатобумажной ваты. Зная массу фильтра до взятия пробы и после, а также объем пропущенного через фильтр воздуха, находят содержание пыли в  $1 \text{ м}^3$  воздуха.

В данной работе начальную концентрацию пыли в воздухе также вычисляют весовым методом, но по иной методике. Через форсунку подают определенное количество пыли за единицу времени в определенный объем проходящего воздуха. Начальная концентрация пыли (в  $\text{г}/\text{м}^3$ )

$$C_1 = G_1/V_1, \quad (3.63)$$

где  $G_1$  — масса пыли, подаваемой в циклон, г/с;  $V_1$  — объем воздуха, подаваемого в циклон,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Конечная концентрация пыли в воздухе, выходящем из циклона,

$$C_2 = G_2/V_2, \quad (3.64)$$

где  $G_2$  — масса пыли, уходящей из циклона, г/с;  $V_2$  — объем воздуха, уходящего из циклона,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Скорость осаждения пыли (в м/с)

$$v_0 = \frac{d^2(\rho_1 - \rho_2)v_1^2}{18\mu R},$$

где  $v_1 = v_{вх}/1,4$  — скорость движения газа в циклоне, м/с;  $v_{вх} = V_1/S_{вх}$  — скорость входа газа в патрубок, м/с;  $S_{вх}$  — площадь поперечного сечения входного патрубка,  $\text{м}^2$ .

Фактор разделения определяют по формуле (3.60).

Гидравлическое (аэродинамическое) сопротивление циклона (в Па)

$$\Delta p = \xi_{\Delta} (v_{вх}^2 \rho_2 / 2), \quad (3.65)$$

где  $\xi_{\Delta}$  — коэффициент сопротивления, зависящий от конструкции циклона.

**Протокол испытания**

Номер опыта	Продолжительность $\tau$	Входной патрубок					Масса пыли $G$
		ширина $a$	высота $b$	площадь поперечного сечения $S_{вх}$	секундный объем воздуха $l$	скорость воздуха $v_{вх}$	
1	2	3	4	5	6	7	8

*Продолжение*

Выхлопная труба			
диаметр $d_{вхл}$	площадь поперечного сечения $S_{вхл}$	секундный объем $V_{сек}$	скорость воздуха $v_{вхл}$
9	10	11	12

*Продолжение*

Циклон			Концентрация пыли		Диаметр частиц пыли $d$	Динамический коэффициент вязкости воздуха $\mu$
диаметр цилиндрической части $D_{ц}$	высота цилиндрической части $H_{ц}$	высота конической части $H_{к}$	на входе в циклон $C_1$	на выходе из циклона $C_2$		
13	14	15	16	17	18	19

**Вопросы для самопроверки\***

1. Поясните схему экспериментальной установки.
2. Какие типы и конструкции центробежных пылеосадителей-циклонов применяются в пищевой промышленности?
3. Какие основные параметры характеризуют работу циклонов?
4. Как определяется запыленность воздуха?
5. Что характеризует фактор разделения?
6. Как определить КПД циклона и каковы пути его увеличения?

\* См. Коузов П. А., Мальгин А. Д., Скрябин Г. М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности М., 1982. — 256 с.

Фильтрацию применяют для разделения суспензий на твердую (осадок) и жидкую (фильтрат) фазы.

Для движения жидкости в порах осадка и фильтрующей перегородки необходимо создать перепад давления по сторонам фильтрующей перегородки, который является движущей силой процесса. Этот перепад может быть создан за счет разрежения (вакуум-фильтры) или давления (фильтры под давлением) с одной стороны фильтрующей перегородки.

Производительность фильтра зависит от режима фильтрации (давление, температура), характера фильтрующей перегородки и физико-химических свойств суспензии и осадка.

Интенсивность фильтрации и производительность фильтров характеризуются величиной скорости фильтрации — количеством фильтрата, проходящего через единицу поверхности фильтра в единицу времени,

$$v_{\phi} = (dV_{\phi}/d\tau)/F_{\phi}, \quad (3.66)$$

где  $V_{\phi}$  — количество фильтрата, м<sup>3</sup>;  $F_{\phi}$  — площадь поверхности фильтрующей перегородки, м<sup>2</sup>;  $\tau$  — продолжительность фильтрации, с.

Поток фильтрата в порах осадка и фильтрующей перегородки характеризуется весьма малыми значениями числа Рейнольдса ( $Re \leq 35$ ), что соответствует ламинарному движению жидкости.

Критериальное уравнение, описывающее ламинарное движение потока фильтруемой жидкости, имеет вид:

$$Eu = (110/Re)(l/d_{эк})$$

или в явной форме

$$\Delta p / (\rho v_{\phi}^2) = 110 \mu / (v_{\phi} d_{эк} \rho) (l/d_{эк}), \quad (3.67)$$

где  $Eu$  — число Эйлера;  $Re$  — критерий Рейнольдса;  $\Delta p$  — перепад давления на фильтре, Па;  $\rho$  — плотность фильтрата, кг/м<sup>3</sup>;  $v_{\phi}$  — линейная скорость прохождения фильтрата через перегородку, м/с;  $d_{эк}$  — эквивалентный диаметр пор, м;  $l$  — длина пор, м;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости фильтрата, Па·с.

В соответствии с основным кинетическим уравнением, согласно которому интенсивность процесса прямо пропорциональна движущей силе и обратно пропорциональна сопротивлению, можно записать:

$$v_{\phi} = \Delta p / R, \quad (3.68)$$

где  $R$  — сопротивление фильтрации.

Сопоставив уравнения (3.66) и (3.68), получим

$$(dV_{\phi}) / (F_{\phi} d\tau) = \Delta p / R. \quad (3.69)$$

Подставив значение линейной скорости фильтрования из уравнения (3.67) в уравнение (3.69), получим выражение сопротивления фильтрованию:

$$R = (110\mu l) / d_{\text{эк}}^2 \quad (3.70)$$

Общее сопротивление фильтрованию складывается из сопротивления фильтрующей перегородки и сопротивления слоя осадка на перегородке:

$$R = R_{\phi} + R_o \quad (3.71)$$

Из уравнения (3.71) видно, что  $R$  зависит от вязкости фильтрата и размеров пор фильтрующей перегородки. Выражая сопротивление перегородки через эквивалентное сопротивление условного слоя осадка, можно записать:

$$R = \mu(R_n + r_o l_o), \quad (3.72)$$

где  $R_n$  — коэффициент, учитывающий сопротивление фильтрующей перегородки,  $\text{м}^{-2}$ ;  $r_o$  — удельное сопротивление осадка,  $\text{м}^{-2}$ ;  $l_o$  — толщина слоя осадка,  $\text{м}$

Если из  $1 \text{ м}^3$  прошедшей через фильтр жидкости (фильтрата) отлагается  $S \text{ м}^3$  осадка, то толщина слоя осадка может быть выражена как

$$l_o = (V_{\phi} S) / F_{\phi} \quad (3.73)$$

Подставив в уравнение (3.69) значение  $R$  из уравнения (3.72) и значение  $l_o$  из уравнения (3.73), получим:

$$\frac{dV_{\phi}}{F_{\phi} d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu [R_n + (V_{\phi} S r_o) / F_{\phi}]}$$

или

$$(V_{\phi} / F_{\phi}) \mu S r_o dV_{\phi} + \mu R_n dV_{\phi} = \Delta p F_{\phi} d\tau \quad (3.74)$$

В зависимости от величины  $\Delta p$  изменяется характер процесса: если  $\Delta p = \text{const}$ , то по мере накопления осадка на фильтре скорость фильтрования  $dV/d\tau$  убывает; такое фильтрование называют нестационарным;

если с увеличением толщины слоя осадка  $l_o$  также соответственно увеличивают  $\Delta p$ , т. е. градиент давления  $\Delta p / l_o$  в слое остается постоянным, то и скорость фильтрования будет также величиной постоянной ( $dV/d\tau = \text{const}$ ); такое фильтрование называют стационарным. В промышленности наиболее распространено нестационарное фильтрование.

Для нестационарного фильтрования из уравнения (3.74) после интегрирования в пределах  $0 - V_{\phi}$  и  $0 - \tau$ , получим:

$$\tau = \frac{S r_o \mu}{2\Delta p} (V_{\phi} / F_{\phi})^2 + \frac{\mu R_n}{\Delta p} (V_{\phi} / F_{\phi}) \quad (3.75)$$

Обозначив в уравнении (3.75)  $(r_0 S \mu) / (2 \Delta p)$  через  $a$  — коэффициент фильтрования, характеризующий сопротивление осадка, отнесенное к  $1 \text{ м}^2$  поверхности фильтрования;  $(\mu R_n / \Delta p)$  через  $b$  — коэффициент фильтрования, характеризующий сопротивление фильтрующей перегородки, отнесенное к  $1 \text{ м}^2$  поверхности фильтрования, отношение  $V_\phi / F_\phi$  через  $V$  — объем фильтрата, прошедшего через  $1 \text{ м}^2$  поверхности фильтрования, и  $S = (l_0 F_\phi / V_\phi = V_0 / V_\phi$  — объем осадка, приходящийся на  $1 \text{ м}^3$  фильтрата, получим окончательное уравнение для нестационарного фильтрования в общем виде:

$$\tau = aV^2 + bV. \quad (3.76)$$

Коэффициенты фильтрования  $a$  и  $b$  находят, используя экспериментальные значения  $V_\phi$  и  $\tau$ .

### Цель работы

1. Ознакомление с устройством фильтр-пресса и его работой.
2. Проведение опытного фильтрования.
3. Расчет коэффициентов фильтрования по экспериментальным данным.
4. Определение продолжительности фильтрования.

### Описание экспериментальной установки

Работу проводят на установке, позволяющей измерять количество фильтрата, прошедшего за определенное (фиксируемое) время. Давление на фильтре в процессе опыта должно поддерживаться постоянным. Установка (рис. 3.20) состоит из рамного фильтр-пресса 2, в который подается суспензия из резервуара 4 с мешалкой 3. Вначале суспензию загружают в резервуар 4 и размешивают мешалкой 3 до получения равномерной концентрации. Затем суспензию вытесняют из резервуара 4 в камеры фильтра сжатым воздухом, подаваемым из компрессорной установки 1. Давление в резервуаре 4 регулируют при помощи воздушного крана 6 и контролируют по манометру 5. Температуру суспензии измеряют термометром. Фильтрат собирают в мерники с водомерными стеклами.

### Методика проведения испытания

Работу проводят в такой последовательности. В резервуар 4 с работающей мешалкой 3 загружают 30—40 л меловой суспензии, после чего люк резервуара герметически закрывают. Лаборант пускает компрессорную установку 1 и при помощи воздуш-

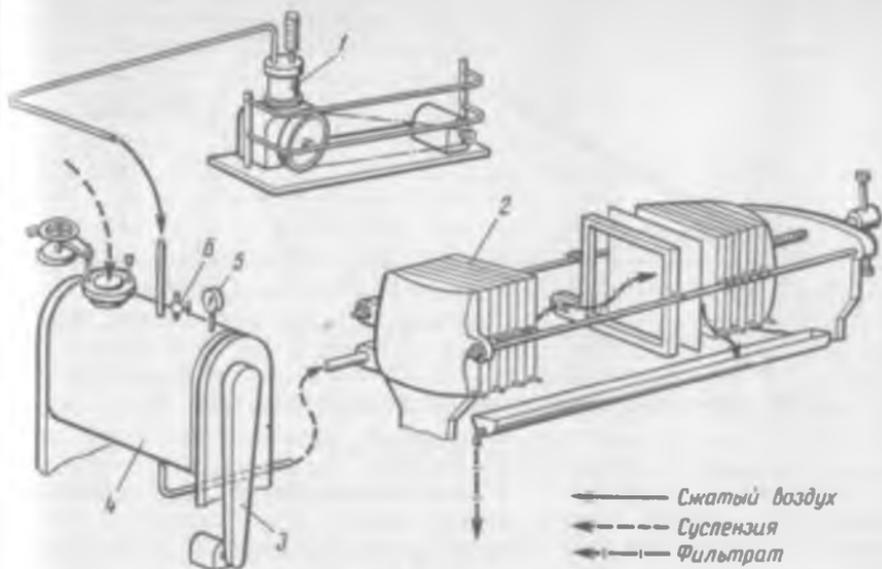


Рис. 3.20. Схема экспериментальной установки для исследования процесса фильтрации:

1 — компрессорная установка; 2 — фильтр-пресс; 3 — мешалка; 4 — резервуар; 5 — манометр; 6 — кран

ного крана 6 в резервуаре устанавливается избыточное давление  $\Delta p = 0,01 - 0,02$  МПа, которое во время испытания поддерживается постоянным. При открытом кране на трубопроводе от резервуара к фильтру суспензия поступает в камеры фильтра. Началом опыта (начало отсчета) считается появление в желобе фильтра первых капель фильтрата.

По мере поступления в мерник очередных 0,5 л фильтрата отмечают количество фильтрата ( $V_\phi$ ), время с начала опыта ( $\tau$ ) и температуру суспензии ( $t$ ). Испытание заканчивают, когда поступление фильтрата практически прекращается. После окончания испытания фильтр разбирают, счищают осадок с фильтрующих перегородок и измеряют его объем  $V_0$ . Результаты испытания записывают в протокол наблюдения по прилагаемой форме.

### Обработка результатов испытания

Для получения коэффициентов фильтрации  $a$  и  $b$  продифференцируем уравнение (3.76):

$$d\tau = 2aVdV + b dV. \quad (3.77)$$

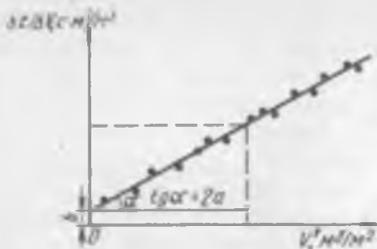


Рис. 3.21. График  $\Delta\tau/\Delta V = f(V')$

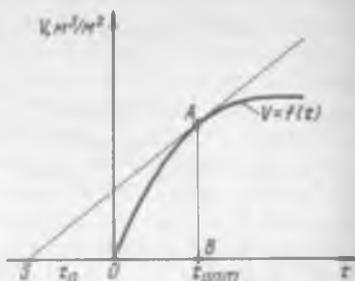


Рис. 3.22. График  $V = f(\tau)$

После перехода к конечным разностям получим

$$\Delta\tau/\Delta V = 2aV + b.$$

Как видно из рис. 3.21, в координатах  $\Delta\tau/\Delta V - V'$  получено уравнение прямой линии, пересекающей ось ординат в точке  $\Delta\tau/\Delta V = b$ ; тангенс угла наклона прямой равен  $2a$ . Показатель  $V'$  означает количество фильтрата, отнесенное к единице фильтрующей поверхности, усредненное по двум последовательным замерам:

$$V' = (V_{n-1} + V_n)/2. \quad (3.78)$$

Коэффициент сопротивления фильтрующей перегородки и удельное сопротивление осадка определяются по формулам:

$$R_n = (b\Delta\rho)/\mu; \quad r_o = (2a\Delta\rho)/(S\mu), \quad (3.79)$$

где  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости фильтрата (определяется по средней температуре суспензии);  $S = V_o/V_\phi$ ;  $V_o$  — объем осадка, найденный экспериментально.

Для модели фильтр-пресса, установленной в лаборатории «Процессы и аппараты» МТИПП,  $f = 0,0625 \text{ м}^2$  (размер рамы  $250 \times 250 \text{ мм}$ ). Отсюда

$$F = fn, \quad (3.80)$$

где  $n$  — число рамок (устанавливается по указанию преподавателя).

Полученные данные вносят в протокол испытания.

#### Протокол испытания

Тип фильтра  
 Площадь поверхности фильтрования  $F$   
 Площадь поверхности перегородки  $f$   
 Число перегородок  $n$   
 Объем фильтрата  $V_\phi$   
 Объем осадка  $V_o$

Время, с		Объем фильтрата		Перепад давления на фильтре, МПа	Температура суспензии, °С	Количество фильтрата, прошедшего через 1 м <sup>2</sup> поверхности, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup>
от начала испытания	между замерами	от начала испытания, м <sup>3</sup>	между замерами, л			

Для определения оптимальной продолжительности фильтрования строим графическую зависимость  $V = f(\tau)$  (рис. 3.22). На оси влево от точки  $O$  откладываем отрезок  $OS$ , равный  $\tau_0$  ( $\tau_0$  — это вспомогательное время для подготовки фильтра к работе, равное 0,25 ч). Из точки  $S$  проводим касательную к кривой  $V = f(\tau)$ . Перпендикуляр, опущенный из точки касания на ось  $\tau$ , отсекает на ней отрезок, равный рекомендуемой продолжительности процесса фильтрования.

#### Вопросы для самопроверки

1. Каково назначение процесса фильтрования?
2. Какие существуют способы создания напора на фильтре?
3. Чем характеризуется режим фильтрования?
4. Дайте характеристику стационарного и нестационарного фильтрования.
5. Каков физический смысл коэффициентов фильтрования?
6. Дайте анализ формулы для определения коэффициентов фильтрования.
7. Каковы основные элементы экспериментальной установки?
8. Как устроен фильтр-пресс?
9. Каков порядок проведения работы?
10. Опишите метод обработки опытных данных и их анализ.

#### Список рекомендуемой литературы

- Жушков В. А. Фильтрование. — М.: Химия, 1971. — 440 с.  
 Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. — М.: Химия, 1971. — 784 с.

#### Работа № 22. ИСПЫТАНИЕ ЦЕНТРИФУГИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Одним из наиболее эффективных способов разделения жидких неоднородных систем, применяемых в пищевой промышленности, является центрифугирование, осуществляемое на специальных машинах — центрифугах. По принципу действия и технологическому назначению центрифуги делятся на отстойные и фильтрующие. Фильтрующие центрифуги предназначены для разделения грубодисперсных сред и отделения влаги от сыпучих нерастворяющихся материалов и продуктов.

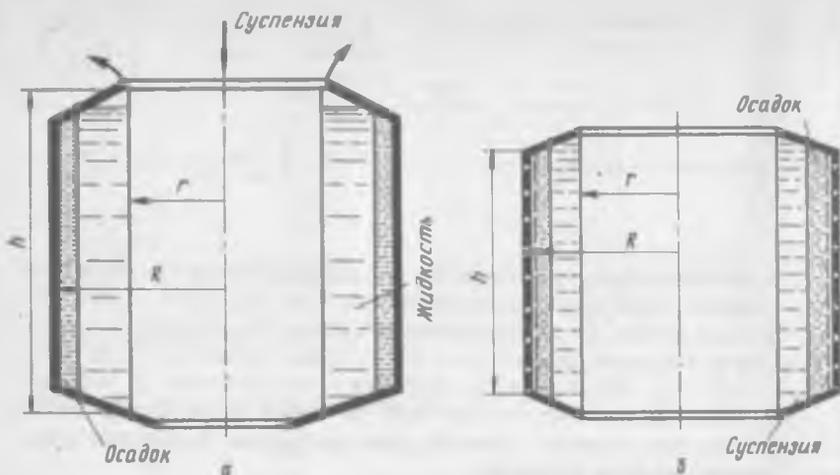


Рис. 3.23. Схемы ротора центрифуги:  
 а — отстойной; б — фильтрующей

Фильтрующая центрифуга имеет ротор (барабан) с натянутой на него перфорированной сеткой, покрытой фильтрующей тканью (рис. 3.23, б). Отстойные центрифуги имеют роторы (барабаны) со сплошными стенками (рис. 3.23, а).

Основной частью обоих типов центрифуг является вращающийся ротор, куда загружают суспензию. При вращении ротора возникает центробежная сила, действующая на суспензию массой  $m$  и весом  $G$ :

$$C = mv^2/R = Gv^2/gR \approx Gn^2R/900, \quad (3.81)$$

где  $R$  — радиус ротора, м;  $n$  — частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ .

Одним из критериев оценки работы центрифуги служит фактор разделения, который является соотношением ускорения центробежной силы ( $v^2/R$ ) и ускорения свободного падения ( $g$ ):

$$\Phi = v^2/gR, \quad (3.82)$$

где  $v$  — окружная скорость барабана, м/с;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $R$  — радиус барабана, м.

Чем выше фактор разделения, тем интенсивнее протекает процесс центрифугирования. Продолжительность разделения можно найти по выражению

$$v_0 = dR/d\tau. \quad (3.83)$$

Так как при  $Re < 0,2$

$$v_0 = [d^2(\rho_1 - \rho_2)v^2]/18\mu R, \quad (3.84)$$

то, подставив вместо  $v$  ее выражение  $\omega R$  (где  $\omega = \pi n/30$  — угловая скорость барабана) и проинтегрировав

$$\int_0^h d\tau = \frac{18\mu}{d^2(\rho_1 - \rho_2)\omega^2} \int_r^R \frac{dR}{R},$$

получим расчетную формулу

$$\tau_0 = \frac{18\mu}{d^2(\rho_1 - \rho_2)\omega^2} \ln \frac{R}{r}. \quad (3.85)$$

Считая, что продолжительность пребывания жидкости в барабане должна быть равна времени осаждения частиц, можно принять, что за время  $\tau_0$  жидкость проходит путь  $h$ , равный высоте барабана со скоростью (в м/с):

$$v_{ср} = V_{сек}/\pi(R^2 - r^2), \quad (3.86)$$

где  $V_{сек}$  — секундный расход материала, м<sup>3</sup>/с;  $R$  — радиус барабана, м;  $r$  — радиус слоя материала в центрифуге, м.

Соотношение между  $R$  и  $r$  определяется степенью загрузки барабана; обычно барабан загружается на половину емкости и  $r \approx 0,71R$ . Следовательно, экспериментально продолжительность осаждения в центрифуге (в с)

$$\tau_0 = h/v_{ср} = [\pi(R^2 - r^2)h]/V_{сек}. \quad (3.87)$$

Зависимость между продолжительностью разделения, полученной экспериментально ( $\tau_{эксп}$ ), и продолжительностью разделения, рассчитанной аналитически ( $\tau_{расч}$ ), можно выразить так:

$$\tau_{эксп} = \varphi\tau_{расч}, \quad (3.88)$$

где  $\varphi$  — поправка на форму частиц\* и другие неучтенные факторы (например, зависимость вязкости от температуры и др.).

## Цель работы

1. Изучение основных закономерностей разделения под действием центробежной силы и ознакомление с устройством центрифуги.

2. Определение скорости разделения и зависимости влажности осадка после центрифугирования от продолжительности процесса.

## Описание экспериментальной установки

Установка включает подвесную центрифугу периодического действия, мерники для фильтрата и емкости для выгрузки осадка. Нижняя часть барабана имеет форму конуса с углом, обеспе-

\* При выводе уравнения принято, что частицы имеют шарообразную форму.

3. Что такое фактор разделения и как его определяют?
4. Как определить влажность осадка после центрифугирования?
5. Поясните порядок проведения работы и проведите анализ опытных данных.

### Работа № 23. ИСПЫТАНИЕ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ

В пищевой промышленности большое распространение получили молотковые дробилки, применяемые в тех случаях, когда на одной ступени измельчения необходимо получить высокодисперсную смесь измельченных частиц. Молотковые дробилки эффективны при разрушении хрупких материалов (зерна, сахара, соли и др.) и менее эффективны при измельчении влажных продуктов и продуктов с высоким содержанием жира.

Молотки должны перемещаться с такой окружной скоростью, при которой обеспечивалось бы первичное разрушение материала в момент ударов по нему молотком. Эту необходимую скорость можно определить приближенно, исходя из закона количества движения:

$$m(v_1 - v_0) = F\tau, \quad (3.95)$$

где  $m$  — масса измельчаемой частицы;  $v_0$  — скорость движения частицы при начальном соприкосновении с молотком;  $v_1$  — скорость движения частицы при ударе по ней молотка;  $F$  — средняя мгновенная сила сопротивления разрушению частицы;  $\tau$  — продолжительность удара.

Степень измельчения материала

$$i = d_{\text{ср}}^{\text{исх}} / d_{\text{ср}}^{\text{изм}}, \quad (3.96)$$

где  $d_{\text{ср}}^{\text{исх}}$  — средний размер частиц исходного продукта;  $d_{\text{ср}}^{\text{изм}}$  — средний размер частиц измельченного продукта.

Для определения среднего размера частиц до и после измельчения материала пробу просеивают через набор сит, взвешивают сходовые фракции и находят численное значение размера частиц. Крупность размол в молотковых дробилках в основном определяется размером и конфигурацией отверстий сита. Чем меньше размер этих отверстий, тем мельче готовый продукт.

### Цель работы

1. Ознакомление с устройством и работой молотковой дробилки.
2. Определение дисперсного состава и степени измельчения по показателям ситового анализа.
3. Определение расхода энергии на размол.

Рис. 3.25. Схема молотковой дробилки:

1 — вал; 2 — диски; 3 — дека; 4 — болт; 5 — стержень; 6 — молоток; 7 — бункер; 8 — дозатор; 9 — винт; 10 — сито; 11 — сборник; 12 — заслонки

### Описание экспериментальной установки

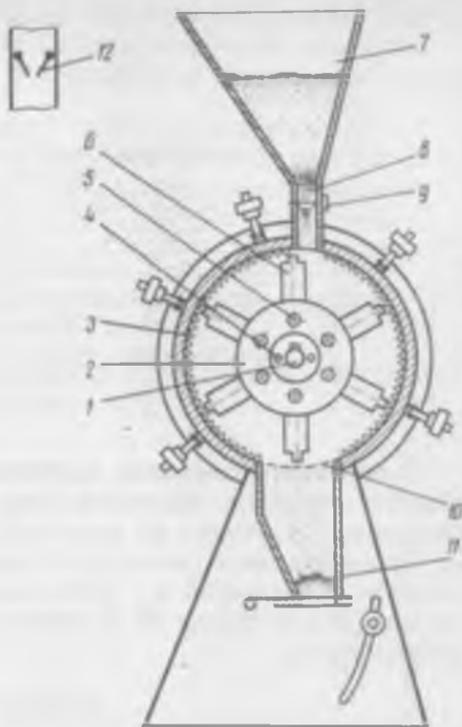
На рис. 3.25 показана дробилка со свободно подвешенными молотками, применяемая для измельчения разных сыпучих пищевых продуктов. На валу 1 при помощи шпонки закреплены два диска 2 с промежуточными кольцами; в осевом направлении диски закреплены болтами 4. На каждом из шести стержней 5 подвешено по пять молотков 6. Вал вращается в двух шариковых подшипниках. Вращательное движение на вал от электродвигателя передается через клиноременную передачу. В нижней части дробилки имеется сменное сито 10, закрепляемое в кольцевых пазах корпуса. Материал, подлежащий измельчению, засыпается в бункер 7, через дозирующее устройство 8 попадает внутрь дробилки на молотки, во взаимодействии с декой 3 измельчается и через сито 10 в размолотом виде выходит в сборник 11.

Дозирующее устройство 8 представляет собой две заслонки 12, зазор между которыми может быть изменен при помощи регулирующего винта 9.

### Методика проведения испытания

Порцию материала (пшеница, ячмень, кукуруза и т. п.) засыпают в бункер молотковой дробилки, затем открывают дозирующее устройство 8 и дробят материал, используя вначале чешуйчатое, а затем обычное сита.

Для получения характеристики дисперсного материала после дробления необходимо провести ситовый анализ. С этой целью отбирают пробы по 0,1 кг, которые просеивают в течение 5 мин



на наборе сит. Остаток на каждом сите взвешивают на технических весах, пересчитывают в процентах к общей массе навески, результаты вносят в протокол № 1 и определяют значения сходов с сит.

### Протокол № 1

Номер шта та	Ситовый анализ после чешуйчатого сита			Ситовый анализ после простого сита		
	масса прохода через сито, г	суммарный процент прохода	суммарный процент схода	масса прохода через сито, г	суммарный процент прохода	суммарный процент схода

В процессе испытаний дробилки при помощи ваттметра определяют мощность холостого хода электродвигателя  $N_{х.х.}$ . Затем загружают дробилку до заданной производительности и измеряют мощность электродвигателя под нагрузкой  $N_p$ . Измельченный продукт, выходящий из дробилки, взвешивают и результаты записывают в протокол № 2. Эксперимент проводят в четырех-пяти повторностях.

### Протокол № 2

Номер опыта	Диаметр сита, мм	Масса навес- ки, кг	Про- должи- тель- ность отбора навес- ки, с	Произ- води- тель- ность, кг/с	Расход энергии, кВт		Удельный расход энергии на измель- чение, кВт·с/кг	Диспер- ность, мм	Степень измель- чения
					на хо- лостой ход	на измель- чение			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

### Обработка результатов испытания

Истинная производительность молотковой дробилки (в кг/с)

$$G_{ист} = m_t / \tau, \quad (3.97)$$

где  $m_t$  — масса навески измельченного продукта, кг;  $\tau$  — продолжительность измельчения навески, с.

Степень измельчения продукта находят по формуле (3.96).  
Удельный расход энергии (в кВт · с/кг)

$$N_{уд} = (N_p - N_{х.х})/G_{ист}. \quad (3.98)$$

По данным эксперимента строят графики изменения дисперсности продукта  $d_{ср} = f(d_c)$ , степени измельчения  $i = f(d_c)$  и удельного расхода энергии  $N_{уд} = f(d_c)$  в зависимости от диаметра отверстия сита.

#### Вопросы для самопроверки

1. Объясните устройство и принцип действия молотковой дробилки.
2. Какие параметры характеризуют работу дробилок?
3. Как проводится ситовый анализ продуктов измельчения?
4. Как влияют форма и размер отверстий сита на крупность измельченного продукта, расход энергии и производительность дробилки?

# Глава 4

## ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

### Работа № 24. ИСПЫТАНИЕ ХЛАДОНОВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Проблема получения и применения холода имеет важное значение в пищевой промышленности. Холод используется не только для сохранения пищевых продуктов; часто хладагенты являются основными рабочими телами во многих технологических процессах. Охлаждение до сравнительно невысоких температур происходит в обычных трубчатых теплообменниках. Большой интерес представляет процесс сушки сублимацией в вакууме, при котором ниже тройной точки происходит сублимация (возгонка) замороженной влаги (льда) материала в парообразное состояние и обратный процесс конденсации пара в твердое состояние (в конденсаторе). Значительный интерес представляет применение тепловых насосов.

Искусственное охлаждение, состоящее в понижении температуры охлаждаемого тела ниже температуры окружающей среды, осуществляют с помощью холодильных машин и без них. При безмашинном охлаждении применяют лед, льдосоляные смеси, сухой лед (твердую углекислоту) и жидкий азот. Этот способ охлаждения прост, но требует значительного расхода холодильного агента, запас которого надо постоянно пополнять. При машинном охлаждении холодильная машина работает долгое время почти без пополнения холодильным агентом и в любое время года может поддерживать заданную температуру.

Наибольшее распространение в пищевой промышленности получили паровые компрессионные (компрессорные) холодильные машины, в которых охлаждение происходит за счет испаряющегося жидкого рабочего тела — холодильного агента (рис. 4.1).

В испаритель 1 машины подают жидкий холодильный агент, который за счет теплоты, отнимаемой от охлаждаемой среды, начинает испаряться. Полученный пар отсасывается компрессором 4, поэтому в испарителе постоянное давление  $p_0$ . Этому давлению соответствует определенная температура кипения. Обычно выбирают такой холодильный агент, который при заданном избыточном давлении  $p_0$  кипит при низкой температуре. Отсасываемый из испарителя пар сжимается в компрессоре до давления

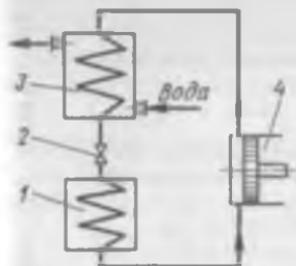


Рис. 4.1. Схема компрессионной холодильной машины:

1 — испаритель; 2 — регулирующий вентиль; 3 — конденсатор; 4 — компрессор

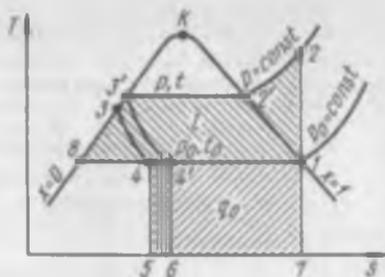


Рис. 4.2. Построение цикла в  $T-S$ -диаграмме

конденсации  $p$  и нагнетается в конденсатор 3. За счет теплообмена с охлаждающей средой (вода или воздух) поступающий в конденсатор перегретый пар охлаждается до состояния насыщения, конденсируется и переохлаждается, а затем через регулирующий вентиль 2 подается в испаритель. С помощью регулирующего вентиля осуществляется регулирование подачи холодильного агента в испаритель и одновременно его дросселирование, т. е. понижение давления конденсации  $p$  до давления в испарителе  $p_0$ . Дросселирование в регулирующем вентиле — необратимый процесс. Энтальпия холодильного агента до и после регулирующего вентиля одна и та же. В нем работа расширения не используется, а превращается в тепло, вызывая дополнительное парообразование холодильного агента.

Процессы, происходящие в холодильной машине, изображены на  $T-S$ -диаграмме (рис. 4.2) следующими линиями:

- 1—2 — линия сжатия в компрессоре (адиабата);
- 2—2' — линия охлаждения перегретого пара до состояния насыщения (изобара);
- 2'—3' — линия конденсации в конденсаторе (изобара, изотерма);
- 3'—3 — линия переохлаждения в конденсаторе (изобара);
- 3—4 — дросселирование в регулирующем вентиле (изоэнтальпа);
- 4—1 — испарение холодильного агента в испарителе (изотерма, изобара).

В целях увеличения холодопроизводительности машины за счет уменьшения парообразования в регулирующем вентиле жидкий холодильный агент перед дросселированием переохлаждают, т. е. понижают его температуру ниже температуры конденсации. В малых холодильных машинах переохлаждение произ-

водят в самом конденсаторе, а в крупных — в специальном теплообменнике. На  $T-S$ -диаграмме повышение холодопроизводительности за счет переохлаждения соответствует площади 4—5—6—4'.

По  $T-S$ -диаграмме можно определить следующие величины: удельную холодопроизводительность холодильного агента  $q_0$ , т. е. количество теплоты, подведенной к единице массы агента в испарителе; численно она равна площади 4—1—7—5, или

$$q_0 = i_1 - i_4; \quad (4.1)$$

количество теплоты  $q_k$ , отводимой от единицы массы холодильного агента в конденсаторе, численно равное площади 2—2'—3'—3—4—5—7, или

$$q_k = i_2 - i_3; \quad (4.2)$$

удельную теоретическую работу компрессора  $l$ , т. е. затрату энергии на единицу массы рабочего тела, численно равную площади 1—2—2'—3'—8, или

$$l = i_2 - i_1, \quad (4.3)$$

где  $i_1 - i_4$  — энтальпия холодильного агента в соответствующих точках цикла;

количество циркулирующего холодильного агента за единицу времени, т. е.

$$G = Q_0/q_0, \quad (4.4)$$

где  $Q_0$  — холодопроизводительность машины, или тепловая нагрузка испарителя; теоретический холодильный коэффициент  $\epsilon_r$ , т. е. отношение количества теплоты, отводимой от охлаждаемого тела, к затраченной работе:

$$\epsilon_r = q_0/l; \quad (4.5)$$

теоретическую мощность, необходимую для компрессора,

$$N_r = Q_0/\epsilon_r. \quad (4.6)$$

В действительности требуется большая мощность компрессора за счет наличия энергетических потерь.

При использовании некоторых холодильных агентов работа протекает более эффективно, если осуществить теплообмен между паром холодильного агента, идущим из испарителя в компрессор, и жидким холодильным агентом перед регулирующим вентилем. Схема и цикл паровой компрессионной машины с теплообменным аппаратом показаны на рис. 4.3 и 4.4. В таком цикле уменьшаются дроссельные потери в регулирующем вентиле вследствие понижения температуры жидкого холодильного агента, но вместе с тем увеличивается работа сжатия в компрессоре из-за перегрева всасываемого пара. Применение теплообменника

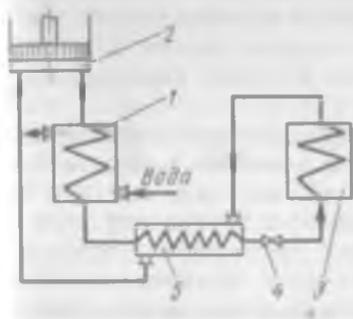


Рис. 4.3. Схема компрессионной холодильной установки с регенеративным теплообменником:

1 — конденсатор; 2 — компрессор; 3 — испаритель; 4 — регулирующий вентиль; 5 — теплообменник

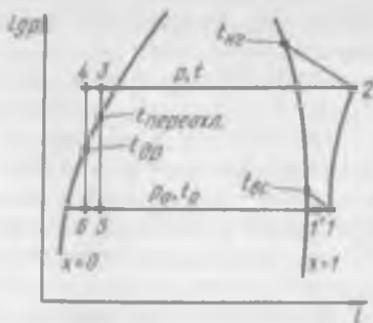


Рис. 4.4. Построение цикла в диаграмме  $\lg p - i$

наиболее эффективно в хладоновых холодильных машинах. Процессы такого цикла на  $\lg p - i$ -диаграмме обозначаются следующими линиями:

1—2 — линия сжатия пара в компрессоре;

2—3 — линия охлаждения, конденсации и переохлаждения в конденсаторе;

3—4 — линия переохлаждения в теплообменнике;

4—6 — линия дросселирования;

6—1' — линия испарения в испарителе;

1'—1 — линия перегрева пара в теплообменнике.

Тепловой баланс теплообменника имеет следующий вид:

$$(i_1 - i_1') G_n = (i_3 - i_4) G_{ж}, \quad (4.7)$$

где  $G_n$  — количество пара, засасываемого компрессором;  $G_{ж}$  — количество жидкости, поступающей к регулируемому вентилю;  $i_1, i_1', i_3, i_4$  — энтальпии в соответствующих точках цикла.

Для установившегося режима работы машины

$$G_n = G_{ж}, \quad (4.8)$$

поэтому можно записать

$$i_1 - i_1' = i_3 - i_4, \text{ или } i_1 - i_3 = i_1' - i_4, \quad (4.9)$$

но  $i_3 = i_5; i_4 = i_6$ , следовательно,

$$q_0 = i_1 - i_5, \text{ или } q_0 = i_1' - i_6. \quad (4.10)$$

Из рис. 4.4 видно, что преимуществ в теоретическом цикле от применения теплообменника нет, так как на сколько возрастает удельная холодопроизводительность, на столько же увеличивается работа сжатия в компрессоре. Однако в действительном

цикле при применении хладона за счет его термодинамических свойств получают выигрыш в работе компрессора на 3—5 %.

В качестве рабочих тел (холодильных агентов) холодильных машин в пищевой промышленности наибольшее применение получили аммиак и хладон 12. Аммиак с термодинамической точки зрения превосходит хладон 12, однако он токсичен и в смеси с воздухом взрывоопасен, что вынуждает располагать машину в отдельном помещении. Хладон 12 практически безвреден, поэтому за последнее время он нашел широкое применение, особенно в малых холодильных машинах, которые могут устанавливаться около потребителей холода. В настоящее время малые холодильные машины выпускаются промышленностью только хладоновые.

### **Цель работы**

1. Изучение принципа работы паровой компрессионной хладоновой установки, приобретение навыков ее эксплуатации.

2. Изучение устройства отдельных элементов установки: конденсатора, испарителя и теплообменного аппарата.

3. Экспериментальное определение параметров холодильного агента в разных точках установки и построение по полученным данным цикла в  $\lg p - i$ -диаграмме.

4. Экспериментальное определение холодопроизводительности, расхода энергии и охлаждающей воды.

5. Расчет по экспериментальным данным теоретического и действительного холодильных коэффициентов.

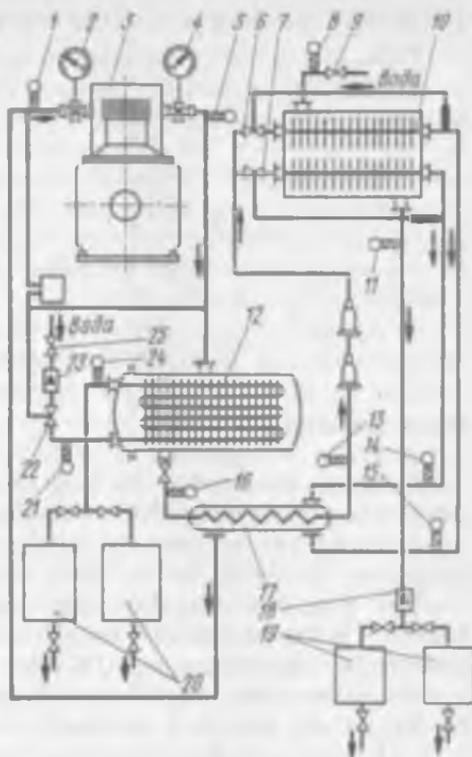
### **Описание экспериментальной установки**

Холодильная установка (рис. 4.5) укомплектована хладоновым компрессорно-конденсаторным агрегатом типа АК2ФВ-6/3, испарителем, приборами автоматики и измерительными приборами. Название агрегата расшифровывается следующим образом: АК — агрегат компрессорно-конденсаторный (укомплектован компрессором, конденсатором, электродвигателем и приборами автоматики), 2ФВ — двухцилиндровый хладоновый вертикальный компрессор 3. Агрегат АК2ФВ-6/3 может быть использован для охлаждения камер площадью 18—20 м<sup>2</sup> при температуре воздуха 0—5 °С.

Конденсатор 12 кожухозмеевиковый с У-образными трубами, с водяным охлаждением, площадью поверхности 2,5 м<sup>2</sup>. Поверхность охлаждения состоит из медных труб с накатанными по ним трапециевидными ребрами (с коэффициентом оребрения 3,6), что увеличивает поверхность теплообмена со стороны хладона, поскольку коэффициент теплоотдачи от хладона к поверхности трубы меньше, чем от поверхности к воде.

Рис. 4.5. Схема экспериментальной холодильной установки:

1, 5, 8, 11, 13, 14, 15, 16, 21, 24 — термометры сопротивления; 2, 4 — манометры; 3 — компрессор; 6, 7, 9, 22, 25 — вентили; 10 — испаритель; 12 — конденсатор; 17 — теплообменник; 18, 23 — ротаметры; 19, 20 — мерные бачки



Испаритель 10 типа ИРСН состоит из двух секций, площадь поверхности теплообмена каждой секции  $1 \text{ м}^2$ . Трубы испарителя медные, оребренные с наружной стороны пластинами из латуни. Испаритель погружен в резервуар, в котором циркулирует вода. Жидкий хладон подается в испаритель через терморегулирующие вентили 6, 7 сверху. Пройдя по змеевикам, он полностью испаряется и перегревается. В перегретом состоянии хладон снизу отсасывается компрессором. Охлаждаемая

вода сливается в канализацию, расход ее измеряется ротаметром 18 или мерными бачками 19, а температура воды на входе и выходе определяется термометрами сопротивления 8 и 11.

Теплообменник 17 марки ТФ-29М змеевиковый, с площадью поверхности теплообмена  $0,1 \text{ м}^2$ . Жидкий хладон проходит по змеевику. Температура хладона на входе в змеевик и выходе из него измеряется термометрами сопротивления 13 и 16. Газообразный хладон движется по межтрубиному пространству. Температура паров на входе в теплообменник измеряется термометрами сопротивления 14 и 15, на выходе — термометром сопротивления 1.

Расход охлаждающей воды, подаваемой в конденсатор, регулируется вручную вентилем 25 или автоматически — регулирующим вентилем 22 и измеряется ротаметром 23 или мерными бачками 20. Температура воды на входе и выходе из конденсатора измеряется термометрами сопротивления 21 и 24.

Терморегулирующие вентили (ТРВ) 6 и 7 предназначены для автоматического регулирования подачи жидкого хладона в испаритель холодильной машины в зависимости от температуры пара хладона на выходе из испарителя.

## Методика проведения испытания

Перед пуском установки открывают вентиль 9, пускают воду в испаритель, наполняя резервуар водой до метки на указательном стекле, устанавливают заданный преподавателем расход воды по ротаметру 18 или мерным бачком 19, включаемым в работу поочередно. Затем открывают вентиль 25, пускают воду в конденсатор, устанавливают заданный преподавателем расход воды по ротаметру 23 или мерным бачком 20, работающим поочередно. Включают компрессор и лентопротяжный механизм самопишущего моста.

В процессе работы следят за показаниями приборов и регулируют расход воды в испаритель, чтобы ее температура на выходе была не ниже 2 °С. По достижении постоянного режима, что определяется по равенству температуры воды на выходе из испарителя в двух последних замерах, измеряют и записывают следующие величины: расход воды в конденсатор по ротаметру 23 или мерному бачку 20; температуру воды на входе и выходе из конденсатора по термометрам сопротивления 21 и 24; давление и температуру хладона на входе и выходе из компрессора по манометрам 2 и 4 и термометрам сопротивления 1 и 5, температуру жидкого и парообразного хладона на концах теплообменника по термометрам сопротивления 13—16; количество воды, поступающей в испаритель, по ротаметру 18 или мерному бачку 19, а ее температуру на входе и выходе — по термометрам сопротивления 8 и 11; расход электроэнергии по счетчику; мощность электродвигателя по ваттметру.

Для каждого режима необходимо провести 5—6 замеров, затем установить другой режим работы установки. С этой целью изменяют расход воды в испаритель или конденсатор так, чтобы изменились  $p_0$  и  $p_k$  (давление в испарителе и конденсаторе). Как только установится постоянный режим работы всех аппаратов, производят замеры так же, как и в первом случае. Испытания проводят для двух-трех режимов.

## Обработка результатов испытания

Средние значения температур и давлений из протокола № 1 наносят на диаграмму для хладона 12 (приложение 12) и находят цикл работы холодильной машины. Построенный цикл переносят на кальку, которую прикладывают к отчету. Цикл работы холодильной машины изображен на рис. 4.4, где точками 1, 2, 3, 4, 6, 1' обозначены следующие параметры:

1 — параметры хладагента на входе в компрессор; находятся на пересечении изобары испарения  $p_0$  в испарителе и изотермы всасывания;

2 — параметры хладагента на выходе из компрессора; нахо-

Протокол № 1

Номер ре-жима	Время замера, мин	Расход воды				Мощность по ватт-метру $N_{\text{в}}$ , кВт	Расчет электроэнергии по счетчику $A_{\text{в}}$ , кВт·ч
		в конденсатор по ротаметру, л/мин	в конденсатор по мернику, л	в испаритель по ротаметру, л/мин	в испаритель по мернику, л		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0						
	4						
	8						
	—						

$T_{\text{общ}}$	$V_{\text{к.ср}}$	$V_{\text{в.общ}}$	$V_{\text{в.ср}}$	$V_{\text{в.общ}}$	$N_{\text{ср}}$	$A_{\text{общ}}$
------------------	-------------------	--------------------	-------------------	--------------------	-----------------	------------------

2

Продолжение

Номер ре-жима	Время замера, мин	Температура хладо-на, °С		Температура пара, °С		Давление хладо-на, МПа		Температура охлаждающей воды, °С					
		на входе $t_1$	на выходе $t_2$	на выходе из испари-теля $t_3$	на выходе из конденса-тора $t_4$	на входе в испари-тель $p_1$	на выходе из испари-теля $p_2$	на входе $t_6$	на выходе из конденса-тора $t_7$				
1	2	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Средние значения за режим

дятся на пересечении изобары конденсации  $p$  и изотермы нагнетания;

3 — параметры хладагента на выходе из конденсатора; находятся на пересечении изобары конденсации и изотермы переохлаждения;

4 — параметры жидкого хладагента на выходе из теплообменника; находятся на пересечении изобары конденсации и изотермы жидкости на выходе из теплообменника;

б — параметры хладагента после дросселирования; находятся на пересечении изохоры, проведенной из точки 4, и изобары испарения;

1' — параметры пара хладагента на выходе из испарителя; находятся на пересечении изобары испарения и изотермы пара на выходе из испарителя (изотерма проводится по средней температуре пара на выходе из испарителя).

Полезную холодопроизводительность, т. е. на охлаждение воды без учета потерь холода (в Вт), определяют по следующим формулам:

при измерении расхода воды ротаметром

$$Q_0 = \frac{V_{\text{в.ср}}}{1000 \cdot 60} \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} (t_9 - t_{10}); \quad (4.11)$$

при измерении расхода воды мерниками

$$Q_0 = \frac{V_{\text{в.мер}}}{60 \tau_{\text{обм}} \cdot 1000} \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} (t_9 - t_{10}), \quad (4.12)$$

где  $V_{\text{в.ср}}$  — средний расход воды в испаритель, л/мин;  $\rho_{\text{в}}$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{\text{в}}$  — удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К);  $\tau_{\text{обм}}$  — продолжительность опыта, мин;  $V_{\text{в.мер}}$  — количество воды в мерниках, л;  $t_9, t_{10}$  — средние температуры воды на входе и выходе из испарителя, °С.

Величины  $c_{\text{в}}$  и  $\rho_{\text{в}}$  берут при средней температуре.

Полная холодопроизводительность (в Вт)

$$Q'_0 = Q_0 + Q_{\text{пот}}, \quad (4.13)$$

где  $Q_{\text{пот}}$  — потери холодопроизводительности за счет притока теплоты из окружающей среды,

или

$$Q'_0 = Q_x - N_r; \quad (4.14)$$

$$N_r = G(i_2 - i_1); \quad (4.15)$$

$$Q_x = G(i_2 - i_3); \quad (4.16)$$

при определении расхода воды ротаметром

$$Q_x = \frac{V_{\text{в.ср}}}{1000 \cdot 60} \rho'_{\text{в}} c'_x (t_{12} - t_{11}); \quad (4.17)$$

при определении расхода воды мерниками

$$Q_k = \frac{V_{\text{обм}}}{60 \tau_{\text{обм}} \cdot 1000} \rho_w^0 c_w' (t_{12} - t_{11}), \quad (4.18)$$

где  $Q_k$  — тепловая нагрузка конденсатора, Вт;  $N_T$  — теоретическая мощность компрессора, Вт;  $i_1, i_2, i_3$  — энтальпия хладагента в соответствующих точках, Дж/кг;  $G$  — количество циркулирующего хладагента, кг/с;  $V_{\text{в.ср}}$  — расход воды в конденсатор по ротаметру, л/мин;  $V_{\text{в.обм}}$  — количество воды в мерниках конденсатора, л;  $\rho_w^0$  — плотность охлаждающей конденсатор воды, кг/м<sup>3</sup>;  $c_w'$  — удельная теплоемкость охлаждающей конденсатор воды, Дж/(кг·К).

Определив  $Q_k$  и решая совместно уравнения для  $Q_k$  и  $N_T$ , найдем

$$N_T = \frac{Q_k(t_2 - t_1)}{i_2 - i_3}; \quad (4.19)$$

$$Q_0' = Q_k \left( 1 - \frac{i_2 - i_1}{i_3 - i_4} \right). \quad (4.20)$$

Теоретический холодильный коэффициент

$$e_T = Q_0' / N_T. \quad (4.21)$$

Действительный холодильный коэффициент

$$e_2 = Q_0 / N_{\text{ср}}, \quad (4.22)$$

где  $N_{\text{ср}}$  — средняя мощность электродвигателя по ваттметру, кВт.

$$N = A_{\text{общ}} / \tau_{\text{общ}}, \quad (4.23)$$

где  $A_{\text{общ}}$  — расход электроэнергии за опыт по счетчику, кВт·ч.

$$A_{\text{общ}} = A_k - A_n, \quad (4.24)$$

здесь  $A_n, A_k$  — показания счетчика электроэнергии в начале и конце режима.

Потери холода в установке

$$Q_{\text{пот}} = Q_0' - Q_0. \quad (4.25)$$

Относительные потери холода (в %)

$$\beta = (Q_{\text{пот}} / Q_0') \cdot 100. \quad (4.26)$$

Результаты расчетов сводят в протокол № 2.

Протокол № 2

Номер режима	$p$ , МПа	$p_0$ , МПа	$N_T$ , кВт	$Q_0$ , кВт	$Q_0'$ , кВт	$Q_k$ , кВт	$e_T$	$e_2$	$\beta$ , %
--------------	-----------	-------------	-------------	-------------	--------------	-------------	-------	-------	-------------

1  
2  
3  
.  
.  
.

## ПРИМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ АППАРАТОВ

### РАСЧЕТ ОДНОХОДОВОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

Рассчитать общий коэффициент теплопередачи и потери теплоты в окружающую среду по данным испытания одноходового теплообменного аппарата, в котором осуществляется нагревание воды сухим насыщенным водяным паром.

Характеристика аппарата: число труб  $n = 6$ , диаметр  $d = 20/22$  мм, длина (высота) труб  $H = 1750$  мм, материал труб — латунь (коэффициент теплопроводности  $93,04$  Вт/(м·К)).

В результате испытаний получены следующие данные:

количество воды, прошедшей через аппарат,  $V = 702$  л

начальная температура воды  $t_1 = 12,8$  °С

конечная температура воды  $t_2 = 57,8$  °С

расход пара, равный количеству конденсата,  $D = 66,2$  кг

давление пара  $p_n = 245$  кПа

температура конденсата на выходе из аппарата  $\theta_{\text{конд}} = 125$  °С

продолжительность испытания  $\tau = 7$  мин  $= 4200$  с.

**Определение общего коэффициента теплопередачи.** Общий коэффициент теплопередачи для цилиндрической стенки находим по формуле (2.7), коэффициент теплоотдачи от пара к внешней поверхности труб для вертикального аппарата — по формуле (2.19).

Пользуясь приложением 1, по давлению пара  $p_n = 245$  кПа находим температуру пара  $t_n = 127$  °С и удельную теплоту парообразования  $r = 2183$  кДж/кг.

Температура пленки конденсата равна температуре выходящего из аппарата конденсата:  $t_{\text{пл}} = \theta_{\text{конд}} = 125$  °С. По приложению 2 находим параметры пленки конденсата: плотность  $\rho = 939$  кг/м<sup>3</sup>; коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,686$  Вт/(м·К); динамический коэффициент вязкости  $\mu = 22,6 \cdot 10^{-6}$  Па·с; кинематический коэффициент вязкости  $\nu = 23,6 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с.

Определяем перепад температур на пленке конденсата, т. е. разность между температурой пара и стенки со стороны пара:  $\Delta t = t_n - t_{\text{ст}}$ . Можно принять, что температура пленки является средней между температурой пара и стенки, т. е.  $t_{\text{пл}} = (t_n + t_{\text{ст}})/2$ , поэтому  $t_{\text{ст}} = 2t_{\text{пл}} - t_n = 2 \cdot 125 - 127 = 123$  °С. Тогда  $\Delta t_{\text{пл}} = t_n - t_{\text{ст}} = 127 - 123 = 4$  °С.

Коэффициент теплоотдачи от пара к поверхности труб

$$\alpha_1 = \sqrt[4]{\frac{2183 \cdot 10^3 \cdot 939 \cdot 0,686^3 \cdot 9,81}{23,6 \cdot 10^{-8} \cdot 1,75 \cdot 4}} = 9140 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности труб воде находим из критериального уравнения. Выбор уравнения определяется режимом движения жидкости, поэтому в первую очередь

устанавливаем режим движения воды. Значение числа Рейнольдса определяем по формуле (2.13).

Предварительно находим следующие показатели: скорость движения воды в трубах аппарата  $v = V_{\text{тек}}/S$ ; количество воды, прошедшей через аппарат,

$$V_{\text{тек}} = \frac{V}{1000 \cdot 60\tau} = \frac{702}{1000 \cdot 60 \cdot 70} = 0,000167 \text{ м}^3/\text{с};$$

площадь поперечного сечения потока воды

$$S = \frac{\pi d^2}{4} n = \frac{3,14 \cdot 0,02^2}{4} 6 = 0,001884 \text{ м}^2;$$

скорость движения воды  $v = 0,000167/0,001884 = 0,0888 \text{ м/с}$ ; среднюю температуру воды в аппарате:

$$t_f = \frac{t_1^2 + t_2^2}{2} = \frac{12,8 + 57,8}{2} = 35,3 \text{ }^\circ\text{C};$$

по приложению 2, исходя из значения  $t_f^p = 35,3 \text{ }^\circ\text{C}$ , находим плотность воды  $\rho = 993,6 \text{ кг/м}^3$ , динамический коэффициент вязкости  $\mu = 729,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$  или кинематический коэффициент вязкости  $\nu = 72 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Определяют число Рейнольдса

$$Re = \frac{0,0888 \cdot 0,02 \cdot 993,6}{729,4 \cdot 10^{-6}} = 2470$$

или

$$Re = \frac{0,0888 \cdot 0,02}{72 \cdot 10^{-8}} = 2470.$$

Так как  $10000 > Re > 2300$ , режим движения воды в трубах аппарата переходный, следовательно, критериальное уравнение имеет вид (2.11):  $Nu = 0,008 Re^{0,9} Pr^{0,43}$ .

Число (критерий) Прандтля определяем по формуле (2.14). При средней температуре воды  $35,3 \text{ }^\circ\text{C}$  удельная теплоемкость воды  $c = 4180 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,625 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Тогда

$$Pr = \frac{4180 \cdot 72 \cdot 10^{-8} \cdot 993,6}{0,625} \approx 4,8.$$

Определяем число (критерий) Нуссельта

$$Nu = 0,008 \cdot 2470^{0,9} \cdot 4,8^{0,43} = 17,6.$$

Коэффициент теплоотдачи от поверхности нагрева воды вычисляем по формуле (2.17):

$$\alpha_2 = \frac{17,6 \cdot 0,625}{0,02} = 550 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Общий коэффициент теплопередачи (расчетный):

$$k_{расч} = \frac{3,14}{\frac{1}{9140 \cdot 0,022} + \frac{1}{2 \cdot 93,04} \cdot 2,3 \lg \frac{0,022}{0,02} + \frac{1}{550 \cdot 0,02}} =$$
$$= 32,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Средний диаметр труб аппарата

$$d_{ср} = \frac{d_{вн} + d_{вн}}{2} = \frac{0,02 + 0,022}{2} = 0,021 \text{ м}.$$

Коэффициент теплопередачи для плоской стенки

$$k_{расч} = \frac{k_{расч}}{nd_{ср}} = \frac{32,6}{3,14 \cdot 0,021} = 495 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

**Определение потерь теплоты в окружающую среду.** Потери теплоты в окружающую среду рассчитываем по формуле (2.38). Предварительно находим:

количество теплоты, отданной паром при конденсации,

$$Q_n^* = Dr = 66,2 \cdot 218,3 \cdot 10^4 = 145200 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 145200 \text{ кДж};$$

количество теплоты, пошедшей на нагревание воды,

$$Q_w^* = G_2 c_2 (t_2^* - t_2) = \frac{702 \cdot 993,6}{1000} 4210(57,8 - 12,8) =$$
$$= 132500 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 132500 \text{ кДж}.$$

потери теплоты по формуле (2.36)

$$Q_{пот} = \frac{145200 - 132500}{145200} 100 \approx 8,9 \text{ \%}.$$

## РАСЧЕТ МНОГОХОДОВОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

Путем реконструкции аппарата требуется повысить интенсивность теплообмена между паром и водой примерно в 2,5 раза по сравнению с данными работы одноходового теплообменного аппарата.

Интенсивность теплообмена определяется общим коэффициентом теплопередачи, поэтому реконструкция аппарата должна идти по пути повышения коэффициента  $k$ . Общий коэффициент теплопередачи зависит от двух коэффициентов теплоотдачи, причем если интенсивность теплоотдачи по обе стороны поверхности нагрева неодинакова, т. е. значения коэффициентов теплоотдачи значительно различаются, общий коэффициент теплопередачи зависит от меньшего коэффициента теплоотдачи.

В предыдущем расчете  $\alpha_2 < \alpha_1$ , т. е. интенсивность теплоотдачи

со стороны воды ниже, чем со стороны пара. Следовательно, для повышения общего коэффициента  $k$  в 2,5 раза примерно во столько же раз должен быть увеличен коэффициент теплоотдачи от поверхности нагрева воде  $\alpha_2$ .

Значение коэффициента теплоотдачи от поверхности нагрева воде определяется числом Нуссельта [формула (2.17)]. Число Нуссельта при определенных свойствах жидкости (воды) зависит от режима ее движения, т. е. от числа Рейнольдса:

$$Nu = f(Re).$$

Следовательно, для увеличения  $\alpha_2$  режим движения воды в аппарате должен быть ближе к турбулентному. Для турбулизации движения воды должна быть увеличена скорость ее движения в аппарате  $v$ , так как

$$Re = \frac{v d_{\text{шт}}}{\mu}.$$

Исходя из уравнения  $V_{\text{сек}} = v_1 S$  увеличение скорости движения воды  $v$  при постоянном ее расходе  $V_{\text{сек}}$  достигается уменьшением площади поперечного сечения потока  $S$ . Для уменьшения площади поперечного сечения потока воду следует подавать не во все трубы аппарата ( $n = 6$ ), а разбить распределительные коробки под крышками перегородками на секции так, чтобы вся вода поступала только в часть труб, а затем протекала в остальные, т. е. сделать в аппарате несколько ходов.

Учитывая приведенные выше зависимости и необходимость по условию повысить интенсивность процесса теплообмена примерно в 2,5 раза, сделаем в аппарате 3 хода. Для этого на верхней и нижней трубных решетках устанавливаем по одной перегородке. При такой схеме вся поступающая вода проходит только по двум трубам ( $n' = 2$ ), делая в аппарате три хода ( $m = 3$ ). В этом случае площадь поперечного сечения потока (труб одного хода):

$$S' = \frac{\pi d^2}{4} n' = \frac{3,12 \cdot 0,02^2}{4} 2 = 0,000628 \text{ м}^2.$$

Скорость воды в аппарате

$$v' = \frac{V_{\text{сек}}}{S'} = \frac{0,000167}{0,000628} = 0,266 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса

$$Re' = \frac{0,266 \cdot 0,02}{72 \cdot 10^{-8}} = 7410.$$

Так как  $2300 < Re < 10000$ , значит режим движения переходный.

Число Нуссельта

$$Nu' = 0,008 \cdot 7410^{0,9} \cdot 4,8^{0,43} = 47,7.$$

Коэффициент теплоотдачи от поверхности нагрева воды по формуле (2.17)

$$\alpha_2' = \frac{47,7 \cdot 0,625}{0,02} = 1490 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Общий коэффициент теплопередачи

$$k_{\text{расч}}' = \frac{3,14}{\frac{1}{9140 \cdot 0,022} + \frac{1}{2 \cdot 93,04} + 2,3 \lg \frac{0,022}{0,02} + \frac{1}{1490 \cdot 0,02}} =$$
$$= 80,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$k_{\text{расч}}^* = \frac{80,3}{3,14 \cdot 0,021} = 1219 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

В одноходовом теплообменном аппарате общий коэффициент теплопередачи  $k = 495 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Следовательно,  $k_{\text{расч}}'/k_{\text{расч}} = 1219/495 = 2,46$ .

Таким образом, за счет увеличения числа ходов в 3 раза общий коэффициент теплопередачи увеличился примерно в 2,5 раза.

#### РАСЧЕТ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Выполнить расчет сушильной установки по данным испытания. Во время испытаний проводилась сушка сахарного песка в барабанной сушилке подогретым в калорифере свежим воздухом.

Количество сахарного песка, поступившего на сушку,  $G_1 = 1,6 \text{ кг}$ . Влажность сахарного песка до сушки  $W_1 = 1,3 \%$ , после сушки  $W_2 = 0,6 \%$ . Продолжительность сушки  $\tau = 1,5 \text{ ч}$ . Показания психрометра до калорифера  $t_{c0} = 25^\circ\text{C}$ ,  $t'_{c0} = 18,5^\circ\text{C}$ , после сушилки  $t_{c2} = 50^\circ\text{C}$ ,  $t'_{c2} = 31^\circ\text{C}$ . Показания термометра после калорифера  $t_1 = 80^\circ\text{C}$ .

Определение количества влаги, испаренной из материала. Количество влаги, испаренной из материала в процессе сушки, находим по формулам (2.131). Предварительно определяем количество материала, поступающего в сушилку в единицу времени:

$$g_1 = G_1/\tau = 1,6/1,5 = 1,066 \text{ кг}/\text{ч}.$$

Тогда

$$U = g_1 \frac{W_1 - W_2}{100 + W_1} = 1,066 \frac{1,3 - 0,6}{100 + 1,3} = 0,00736 \text{ кг}/\text{ч}.$$

**Определение параметров воздуха.** Для расчета расхода воздуха и расхода теплоты необходимо знать параметры свежего воздуха, воздуха после калорифера и отработанного воздуха после сушилки.

Относительную влажность воздуха находим по психрометрической таблице по температуре воздуха  $t_c$  и психрометрической разности  $e = t_c - t_w$ . Ввиду незначительной ошибки в показании смоченного термометра можно считать ее равной истинной температуре мокрого термометра. Тогда для свежего воздуха  $e_0 = 25 - 18,5 = 6,5$  К, для воздуха после сушилки  $e_2 = 50 - 31 = 19$  К.

По приложению 1, пользуясь значениями  $t_c$  и  $e$ , находим относительную влажность воздуха: свежего  $\varphi_0 = 55\%$ , отработанного  $\varphi_2 = 26\%$ .

Удельное влагосодержание воздуха определяем по формуле (2.100). По приложению 1 находим давление насыщенного пара: для свежего воздуха  $p_{нас0} = 3,16$  кПа при  $t_{c0} = 25^\circ\text{C}$ , для отработанного воздуха  $p_{нас2} = 12,3$  кПа при  $t_{c2} = 50^\circ\text{C}$ .

Принимаем барометрическое давление равным среднегодовому значению  $p_b = 99$  кПа, тогда удельное влагосодержание воздуха: свежего

$$d_0 = 622 \frac{0,55 \cdot 3160}{99000 - 0,55 \cdot 3160} = 11,05 \text{ г/кг};$$

после калорифера

$$d_1 = d_0 = 11,05 \text{ г/кг}.$$

По известному удельному влагосодержанию нагретого воздуха (после калорифера) можно определить его относительную влажность, пользуясь формулой (2.102),

$$d = 622 \frac{\varphi p_{нас}}{p_0 - \varphi p_{нас}},$$

отсюда

$$\varphi = \frac{p_a/d}{p_{нас}(622 + d)} 100.$$

По приложению 1 по температуре  $t_{c1} = 80^\circ\text{C}$  определяем  $p_{нас} = 47,2$  кПа, тогда

$$\varphi_1 = \frac{99000 \cdot 11,05}{47200(622 + 11,5)} 100 = 3,66\%.$$

Удельное влагосодержание отработанного воздуха

$$d_2 = 622 \frac{0,26 \cdot 12300}{99000 - 0,26 \cdot 12300} = 20,8 \text{ г/кг}.$$

По формуле (2.103) определяем удельную энтальпию воздуха: свежего

$$I = 1012 \cdot 25 + \frac{11,05}{1000} (2500000 + 1842 \cdot 25) = 53400 \text{ Дж/кг} = \\ = 53,4 \text{ кДж/кг};$$

после калорифера

$$I_1 = 1012 \cdot 80 + \frac{11,05}{1000} (2500000 + 1842 \cdot 80) = \\ = 109500 \text{ Дж/кг} = 109,5 \text{ кДж/кг};$$

отработанного

$$I_2 = 1012 \cdot 50 + \frac{20,8}{1000} (2500000 + 1842 \cdot 50) = 104400 \text{ Дж/кг} = \\ = 104,4 \text{ кДж/кг}.$$

**Определение расхода воздуха.** При расчете сушильной установки определяем удельный и полный расход воздуха.

Удельный расход воздуха рассчитываем по формуле (2.125)

$$l = \frac{1000}{20,8 - 11,05} = 102 \text{ кг/кг испаренной влаги}.$$

Полный расход воздуха рассчитываем с учетом количества испаренной влаги в единицу времени по формуле (2.125)

$$L = 102 \cdot 0,00736 = 0,75 \text{ кг/ч}.$$

**Определение расхода теплоты в калорифере.** Удельный расход теплоты в калорифере подсчитываем по формуле (2.126):

$$q_{\text{кал}} = 102(109,5 - 53,4) = 5720 \text{ кДж/кг испаренной влаги}.$$

Полный расход теплоты в калорифере определяем с учетом количества испаренной влаги в единицу времени по формуле (2.126)

$$Q_{\text{кал}} = 5720 \cdot 0,00736 = 42,1 \text{ кДж/ч} = 0,0117 \text{ кВт}.$$

#### **РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИЛЬТРОВАНИЯ НА РАМНОМ ФИЛЬТР-ПРЕССЕ**

Данные для расчета

Тип фильтра — рамный фильтр-пресс

Площадь одной фильтрующей перегородки  $f = 0,0625 \text{ м}^2$

Число перегородок рамок  $n = 5$

Площадь поверхности фильтрования  $F = 0,3125 \text{ м}^2$

Перепад давления на фильтре  $\Delta p = 0,03 \text{ МПа}$

Полученные в процессе испытания данные внесены в протокол № 1.

Протокол № 1

Номер опыта $u$	Время, с		Объем фильтрата, $10^3 \text{ м}^3$		Объем фильтрата, прошедшего через $1 \text{ м}^2$ перегородки, $10^3 \text{ м}^3/\text{м}^2$		$\Delta\tau/\Delta V$ , $10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^3$
	от начала испытания $t$	между замерами $\Delta t$	от начала испытания	между замерами	$V$	$\Delta V$	
1	20	20	0,5	0,5	1,6	1,6	12,50
2	40	20	1,0	0,5	3,2	1,6	12,50
3	65	25	1,5	0,5	4,8	1,6	15,63
4	95	30	2,0	0,5	6,4	1,6	18,75
5	135	40	2,5	0,5	8,0	1,6	25,00
6	175	40	3,0	0,5	9,6	1,6	25,00
7	235	60	3,5	0,5	11,2	1,6	37,50
8	300	65	4,0	0,5	12,8	1,6	40,63
9	375	75	4,5	0,5	14,4	1,6	46,88
10	465	90	5,0	0,5	16,0	1,6	56,25
11	558	93	5,5	0,5	17,6	1,6	58,12
12	651	100	6,0	0,5	19,2	1,6	62,50

Для расчета строим график зависимости  $\Delta\tau/\Delta V = f(V)$  (см. рис. 3.21); на графике уравнению прямой  $\Delta\tau/\Delta V = b + 2aV$  соответствует начальный участок опытных данных. Для получения значений коэффициентов  $b$  и  $2a$  методом наименьших квадратов (МНК) составляем таблицу результатов опытов (протокол № 2), соответствующих линейному участку графика (от  $u = 3$  до  $u = 7$ ).

Протокол № 2

Обозначение	Номер опыта $u$						
	1	2	3	4	5	6	7
$V \cdot 10^3 = c_u$	4,8	6,4	8,0	9,6	11,2	12,8	14,4
$\frac{\Delta\tau}{\Delta V} \cdot 10^{-3} = y_u$	15,63	18,75	25,0	25,0	37,5	40,63	46,88
$\frac{c_u - c_0}{\lambda \beta} = x_u$	-3	-2	-1	0	1	2	3
$\beta_u \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^3$	13,83	19,18	24,52	29,86	35,20	40,55	45,89
$\beta_u - y_u, \text{ м}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^3$	-1,80	+0,43	-0,48	+4,86	-2,30	-0,08	-0,99

Интервал варьирования  $\lambda = c_{u+1} - c_u = 6,4 - 4,8 = 1,6$ .

Чтобы воспользоваться табл. 6 для реализации МНК, переходим к безразмерному выражению фактора

$$x_u = (c_u - c_0)/\lambda,$$

где  $c_0 = 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2$ .

тогда  $x_n = (4,8 - 9,6)/1,6 = -3$ ; соответственно  $x_2 = -2$ ;  $x_3 = -1$ ;  $x_4 = 0$ ;  $x_5 = 1$ ;  $x_6 = 2$ ;  $x_7 = 3$ . Ориентируясь на линейное уравнение  $y = b_0 + b_1x$ , проводим оценку коэффициентов, используя формулу (1.30). Величины  $a_{1n}$  и  $d_l$  берем из табл. 6 при  $N = 7$  и  $l = 1$ . Тогда

$$b_0 = \frac{15,63 + 18,75 + 25 + 25 + 37,5 + 40,63 + 46,88}{7} 10^3 = \frac{209,39}{7} = 29,9 \cdot 10^3 \text{ м}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^3;$$

$$b_1 = \frac{-3 \cdot 15,63 - 2 \cdot 18,75 - 25 + 37,5 + 2 \cdot 40,63 + 3 \cdot 46,88}{28} 10^3 = \frac{150,01}{28} = 5,35 \cdot 10^3 \text{ м}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^3.$$

Зная  $b_0$  и  $b_1$ , получаем  $y = 29,9 \cdot 10^3 + 5,35 \cdot 10^3 x$ .

Полученное уравнение для размерного выражения функциональной зависимости приобретает следующий вид:

$$y = 29,9 \cdot 10^3 + 5,35 \cdot 10^3 \frac{c - c_0}{\lambda} = -2,2 \cdot 10^3 + 3,34 \cdot 10^6 c.$$

Уравнение  $y = -2,2 \cdot 10^3 + 3,34 \cdot 10^6 c$ , соответствующее выражению ( $y = b_0 + b_1x$ ), дает прямую, проходящую среди экспериментальных точек. Расчетное значение для опыта  $u = 1$

$$\hat{y}_1 = -2,2 \cdot 10^3 + 3,34 \cdot 10^6 \cdot 4,8 \cdot 10^{-3} = 13,83$$

и т. д. для всех семи точек.

Методом проверки правильности арифметических выкладок служит условие  $\sum_{n=1}^7 (\hat{y}_n - y_n) = -5,65 + 5,29 = 0,37$ , что близко к 0.

Таким образом, коэффициенты фильтрации в уравнении (3.77) будут иметь следующие значения:

$$b = -2,2 \cdot 10^3 \text{ м}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^3;$$

$$2a = 3,34 \cdot 10^6 \text{ с}/\text{м}^2.$$

Значения коэффициента сопротивления фильтрующей перегородки  $R_0$  и удельного сопротивления осадка  $r_0$  можно рассчитать по формуле (3.79).

#### Вопросы для самопроверки

1. С какой целью делают обрешение труб в конденсаторе и испарителе?
2. Как защищен конденсатор от чрезмерного повышения давления?
3. Каково назначение терморегулирующего вентиля, реле давления, водорегулятора?
4. Что такое удельная холодопроизводительность хладагента и как она определяется?

5. Как изменится режим работы холодильной машины, если увеличить расход воды, подаваемой на охлаждение конденсатора?
6. Как определить экспериментально потери холода?
7. С какой целью создают перегрев пара хладагента на выходе из испарителя и как это достигается?
8. Для каких целей в хладоновых установках применяют теплообменники?
9. В зависимости от каких условий у холодильной машины может изменяться холодильный коэффициент? Покажите это на тепловой диаграмме  $T-S$ .
10. Как производится охлаждение испытываемого вами компрессора?

#### *Список рекомендуемой литературы*

Якобсон В. Б. Малые холодильные машины. — М.: Пищевая промышленность, 1977. — 367 с.

Чумак И. Г., Чепуренко В. П., Чучлин С. Г. Холодильные установки. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. — 344 с.

Приложение I

Параметры водяного пара в состоянии насыщения (по температуре)

Температура, °С	Давление, $10^{-1}$ Па	Удельная теплота парообразова- ния, кДж/кг	Энтальпия пара, кДж/кг	Энтальпия жидкости, кДж/кг
10	1,23	2476,9	2518,7	41,99
11	1,31	2474,3	2520,4	46,19
12	1,40	2472,3	2522,5	50,38
13	1,50	2469,7	2524,2	54,57
14	1,59	2467,6	2526,3	58,75
15	1,71	2465,1	2527,9	62,94
16	1,82	2462,6	2529,6	67,13
17	1,94	2460,1	2531,3	71,31
18	2,06	2457,6	2532,9	75,50
19	2,19	2455,5	2535,0	79,68
20	2,34	2453,0	2536,7	83,86
21	2,49	2450,5	2538,4	88,04
22	2,64	2448,4	2540,5	92,22
23	2,82	2445,9	2542,2	96,41
24	2,98	2443,8	2544,3	100,59
25	3,17	2441,3	2546,9	104,77
26	3,36	2438,8	2547,6	108,95
27	3,66	2436,7	2549,7	113,13
28	3,78	2434,2	2551,4	117,31
29	4,00	2432,1	2553,5	121,48
30	4,24	2429,6	2555,1	125,66
31	4,46	2427,0	2556,8	129,84
32	4,86	2424,9	2558,9	134,02
33	5,10	2422,4	2560,6	138,20
34	5,33	2419,9	2562,3	142,38
35	5,63	2417,8	2564,3	146,56
36	5,95	2415,3	2566,0	150,74
37	6,27	2412,8	2567,7	154,92
38	6,63	2410,7	2569,8	159,09
39	6,99	2408,2	2571,5	163,27
40	7,35	2405,7	2573,1	167,45
41	7,75	2403,6	2575,2	171,63
42	8,20	2401,1	2576,9	175,81
43	8,64	2398,6	2578,6	179,99
44	9,10	2396,1	2580,2	184,17
45	9,57	2393,6	2581,9	188,35

Температура, °С $t$	Давление, $10^{-3}$ Па $p$	Удельная теплота парообразова- ния, кДж/кг $r$	Энтальпия пара, кДж/кг $h'$	Энтальпия жидкости, кДж/кг $h$
46	10,10	2391,0	2583,6	192,53
47	10,62	2388,9	2585,7	196,71
48	11,15	2386,4	2587,4	200,89
49	11,75	2383,9	2598,0	205,07
50	12,35	2381,8	2591,1	209,26
51	12,99	2379,3	2592,8	213,44
52	13,61	2376,8	2594,5	217,62
53	14,40	2374,7	2596,6	221,80
54	15,01	2372,2	2598,2	225,98
55	15,75	2369,7	2599,9	230,17
56	16,38	2367,6	2602,0	234,35
57	17,30	2365,1	2603,7	238,54
58	18,20	2362,6	2605,4	242,72
59	19,05	2360,1	2607,0	246,92
60	19,92	2357,6	2608,7	251,09
61	20,84	2355,0	2610,4	255,28
62	21,81	2352,5	2612,1	259,46
63	22,81	2350,0	2613,7	263,65
64	23,88	2347,5	2615,4	267,84
65	25,01	2345,0	2617,1	272,02
66	26,20	2342,5	2618,8	276,21
67	27,38	2340,0	2620,4	280,40
68	28,31	2337,5	2622,1	284,59
69	29,80	2335,4	2624,2	289,78
70	31,10	2332,9	2625,9	292,97
71	32,45	2330,3	2627,6	297,16
72	34,10	2327,8	2629,2	301,36
73	35,45	2325,3	2630,9	305,55
74	37,00	2322,8	2632,6	309,74
75	38,45	2320,3	2634,2	313,94
76	40,17	2317,8	2635,9	318,13
77	41,90	2315,3	2637,6	322,33
78	43,60	2312,8	2639,3	326,52
79	45,50	2310,3	2640,9	330,72
80	47,40	2307,7	2642,6	334,92
81	49,40	2305,2	2644,3	339,11
82	51,49	2302,7	2646,0	343,31
83	53,40	2300,2	2647,6	347,51
84	55,70	2297,7	2649,3	351,71
85	57,60	2295,2	2651,0	355,92
86	60,20	2292,7	2652,7	360,12
87	62,40	2290,2	2654,3	364,32
88	65,00	2287,6	2656,0	368,53
89	67,50	2284,7	2657,3	378,73
90	71,00	2282,2	2658,9	376,94
91	72,70	2279,7	2660,6	381,15
92	75,70	2277,2	2662,7	385,36
93	78,40	2274,7	2664,4	389,57
94	82,50	2272,2	2666,1	393,78
95	84,50	2269,2	2667,3	397,99
96	87,70	2266,7	2669,0	402,20

Температура, °С	Давление, $10^{-2}$ Па	Удельная теплота парообразова- ния, кДж/кг	Энтальпия пара, кДж/кг	Энтальпия жидкости, кДж/кг
97	91,00	2264,2	2670,7	406,42
98	94,30	2261,7	2672,3	410,63
99	97,70	2258,8	2673,6	414,85
100	101,30	2256,3	2675,3	419,06
101	104,99	2254,6	2677,9	423,28
102	108,78	2252,0	2679,5	427,50
103	112,67	2249,3	2681,0	431,73
104	116,68	2246,6	2682,6	435,95
105	120,80	2243,9	2684,1	440,17
106	125,04	2241,3	2685,7	444,40
107	129,41	2238,6	2687,2	448,63
108	133,90	2235,9	2688,8	452,85
109	138,52	2233,2	2690,3	457,08
110	143,26	2230,5	2691,8	461,32
111	148,14	2227,7	2693,3	465,55
112	153,16	2225,0	2694,8	469,78
113	158,32	2222,3	2696,3	474,02
114	163,61	2219,5	2697,8	478,26
115	169,05	2216,8	2699,3	482,50
116	174,64	2214,1	2700,8	486,74
117	180,38	2211,2	2702,2	490,98
118	186,26	2208,5	2703,7	495,22
119	192,33	2205,7	2705,2	499,47
120	198,54	2202,9	2706,6	503,70
121	204,91	2200,1	2708,1	508,00
122	211,45	2197,3	2709,5	512,20
123	218,15	2194,4	2710,3	516,50
124	225,03	2191,6	2712,3	520,70
125	232,09	2188,8	2713,3	525,00
126	239,32	2186,0	2715,2	529,20
127	246,74	2183,1	2716,6	533,50
128	254,34	2180,1	2717,9	537,80
129	262,13	2177,3	2719,3	542,00
130	270,12	2174,4	2720,7	546,30
131	278,30	2171,5	2722,1	550,60
132	286,68	2168,6	2723,4	554,80
133	295,27	2165,7	2724,8	559,10
134	304,06	2162,7	2726,1	563,40
135	313,06	2159,7	2727,4	567,70
136	322,27	2156,8	2728,8	572,00
137	331,71	2153,9	2730,1	576,20
138	341,37	2150,9	2731,4	580,50
139	351,25	2147,9	2732,7	584,80
140	361,36	2144,9	2734,0	589,10
141	371,70	2141,8	2735,2	593,40
142	382,28	2138,8	2736,5	597,70
143	393,11	2135,8	2737,8	602,00
144	404,18	2132,7	2739,0	606,30
145	415,50	2129,7	2740,3	610,60
146	427,07	2126,6	2741,5	614,90
147	438,90	2123,5	2742,5	619,20

Температура, °С	Давление, $10^3$ Па	Удельная теплота парообразования, кДж/кг	Энтальпия пара, кДж/кг	Энтальпия жидкости, кДж/кг
148	450,99	2120,4	2743,9	623,50
149	463,34	2117,3	2745,1	627,80
150	475,97	2114,1	2746,3	632,20
151	488,87	2111,0	2747,5	636,50
152	502,05	2107,9	2748,7	640,80

## Приложение 2

## Физические параметры воды

Температура, °С	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	Энтальпия, $10^{-3}$ Дж/кг	Удельная теплоемкость, $10^{-3}$ Дж/(кг·К)	Теплопроводность, $10^2$ Вт/(м·К)	Динамический коэффициент вязкости, $10^6$ Па·с	Кинематический коэффициент вязкости, $10^6$ м <sup>2</sup> /с	Коэффициент объемного расширения	Критерий Прандтля
0	1000	0	4,23	55,1	1790	1,79	-0,63	13,7
10	1000	41,9	4,19	57,5	1310	1,31	+0,70	9,52
20	998	83,8	4,19	59,9	1000	1,01	1,82	7,02
30	996	126	4,18	61,8	804	0,81	3,21	5,42
40	992	168	4,18	63,4	657	0,66	3,87	4,31
50	988	210	4,18	64,8	549	0,556	4,49	3,54
60	983	251	4,18	65,9	470	0,478	5,11	2,98
70	978	293	4,19	66,8	406	0,415	5,70	2,55
80	972	335	4,19	67,5	355	0,365	6,32	2,21
90	965	377	4,19	68,0	315	0,326	6,95	1,95
100	958	419	4,23	68,2	283	0,295	7,52	1,75
120	943	532	4,27	68,5	238	0,253	8,64	1,47
140	923	590	4,27	68,5	201	0,217	9,72	1,26

## Приложение 3

Коэффициенты местных сопротивлений  $\xi$ 

Вид сопротивления	Re	$f_n/f_0$					
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Внезапное расширение	10	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
	100	1,70	1,40	1,20	1,10	0,90	0,80
	1000	2,00	1,60	1,30	1,05	0,90	0,60
	3000	1,00	0,70	0,60	0,40	0,30	0,20
	3500	0,81	0,64	0,50	0,36	0,25	0,16
	и более						



Вид сопротивления	Re	$l_w/l_0$					
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Внезапное сужение 	10	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	100	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80
	1000	0,64	0,50	0,44	0,35	0,30	0,24
	10 000	0,5	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20

Примечание. Коэффициенты  $\xi$  отнесены к скорости в меньшем сечении.

## Приложение 4

Психрометрическая таблица для определения относительной влажности воздуха

$t_c - t_w$	Температура сухого термометра, °C													
	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,5	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97
1	94	94	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
1,5	91	91	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	93	93
2	88	89	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	91	91
2,5	85	86	87	87	87	87	87	87	87	87	88	88	88	88
3	82	83	84	84	84	84	84	84	85	85	86	86	86	86
3,5	79	80	81	81	81	81	82	82	83	83	83	84	84	84
4	77	78	79	79	79	79	80	80	81	81	81	82	82	82
4,5	74	75	76	76	76	76	78	78	79	79	79	80	80	80
5	71	72	73	74	74	74	75	76	77	77	77	78	78	78
6	66	67	68	69	70	70	71	72	73	73	73	74	74	75
7	62	62	63	64	65	66	67	68	69	69	70	70	71	71
8	55	58	59	60	61	62	63	64	65	65	66	67	67	68
9	52	53	54	55	56	58	59	60	60	61	61	62	63	63
10	48	49	50	51	52	54	55	56	57	58	58	59	60	61
11	44	45	46	47	48	50	51	52	53	54	55	56	57	57
12	40	42	43	45	46	47	48	48	50	51	52	53	54	54
13	36	38	39	41	42	44	45	46	47	48	49	50	51	52
14	32	35	36	38	39	41	42	43	44	45	46	47	48	49
15	29	31	33	34	36	37	38	39	41	42	43	44	45	46
16	25	28	30	31	33	34	36	37	38	39	40	41	42	43
17	23	25	27	28	30	31	33	34	35	36	37	38	39	40
18	19	22	24	25	27	29	30	32	33	34	35	36	37	38
19	17	19	21	22	24	26	27	29	30	31	32	33	34	35
20	14	16	18	20	22	24	25	27	28	29	30	31	32	33
21	11	13	16	17	19	21	22	24	25	27	28	29	30	31
22	8	11	13	15	17	19	20	22	23	25	26	27	28	29

$t_c$	Температура сухого термометра, °С													
	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66
23	—	—	10	12	14	16	18	20	21	22	24	25	26	27
24	—	—	8	10	12	14	16	18	19	20	22	23	24	25
25	—	—	—	—	10	12	14	16	17	18	20	21	22	23
26	—	—	—	—	8	10	12	14	15	17	18	19	20	22
27	—	—	—	—	—	—	10	12	13	15	16	17	18	20
28	—	—	—	—	—	—	8	10	12	13	14	16	17	18
29	—	—	—	—	—	—	—	8	10	11	12	14	15	16
30	—	—	—	—	—	—	—	7	8	9	11	13	14	15
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	10	11	12
34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10

## Приложение 5

Показание смоченного термометра $t_m$	Разность показаний сухого и смоченного термометров ( $t_c - t_m$ )																					
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	
0	100	90	81	73	64	57	50	43	36	31	26	20	16	11	7	3						
1	100	90	82	74	66	59	52	46	39	33	29	19	19	15	11	7						
2	100	90	83	75	67	61	54	47	42	36	31	26	23	16	14	10						
3	100	90	83	76	69	63	56	49	44	39	34	29	26	21	17	13	10					
4	100	91	84	77	70	64	57	51	46	41	38	32	28	24	20	16	14	11				
5	100	91	85	78	71	65	59	54	48	43	39	34	30	27	23	19	17	13	10			
6	100	92	85	78	72	66	61	56	50	45	41	35	33	29	26	22	19	16	13	10		
7	100	92	86	79	73	67	62	57	52	47	43	39	35	31	28	25	22	12	15	12	11	
8	100	92	86	80	74	68	63	58	54	49	45	41	37	33	30	27	25	21	18	15	14	
9	100	93	86	81	75	70	65	60	55	51	47	43	39	35	32	29	27	24	21	18	17	
10	100	94	87	82	76	71	66	61	57	53	48	45	41	32	34	31	28	26	23	21	19	
11	100	94	82	82	77	72	67	62	59	55	50	47	43	40	36	33	30	29	25	23	20	
12	100	94	82	82	78	73	68	63	59	56	52	48	44	42	38	35	32	30	27	25	22	
13	100	94	89	83	78	73	69	64	61	57	53	50	46	43	40	37	34	32	29	27	24	
14	100	94	89	83	79	74	70	66	62	58	54	51	47	45	41	39	36	34	31	29	26	
15	100	94	89	84	80	75	71	67	63	59	55	52	49	46	43	41	37	35	33	31	28	
16	100	95	90	84	80	75	72	67	64	60	57	53	50	48	44	42	39	37	34	32	30	
17	100	95	90	84	81	76	73	68	65	61	58	54	52	49	46	44	40	39	36	34	31	
18	100	95	90	85	81	76	74	68	66	62	59	56	53	50	47	45	42	40	37	35	33	
19	100	95	91	85	82	77	74	70	66	63	60	57	54	51	48	46	43	41	39	37	34	
20	100	95	91	86	82	78	75	71	68	64	61	58	55	53	49	47	44	43	40	38	36	
21	100	95	91	86	83	79	75	71	68	65	62	59	56	54	51	49	46	44	41	39	37	
22	100	97	91	87	83	79	76	72	69	65	63	60	57	55	52	50	47	45	42	40	38	
23	100	96	91	87	83	80	76	72	69	66	63	61	58	56	53	51	48	46	43	41	39	
24	100	96	92	88	84	80	77	73	70	67	64	62	59	56	53	52	49	47	44	41	42	
25	100	96	92	88	84	81	77	74	70	68	65	63	58	57	54	52	50	47	45	44	42	

Теплофизические свойства воздуха при  $p = 760$  мм рт. ст.

Температура, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	Теплопроводность, 10 <sup>2</sup> Вт/(м·К)	Динамический коэффициент вязкости, 10 <sup>4</sup> Па·с	Кинематический коэффициент вязкости, 10 <sup>4</sup> м <sup>2</sup> /с
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,97
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02
80	1,000	1,009	3,05	21,1	21,09
90	0,972	1,009	3,13	21,5	22,10
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13
120	0,898	1,009	3,34	22,8	25,45
140	0,854	1,013	3,49	23,7	27,80

## Приложение 7

Плотность сахарных растворов (в кг/м<sup>3</sup>) в зависимости от содержания сухих веществ и температуры

Содержание сухих веществ, %	Температура, °С							
	20	30	40	50	60	70	80	90
15	1059	1056	1053	1048	1043	1038	1033	1026
20	1081	1078	1074	1069	1062	1059	1052	1074
30	1127	1123	1119	1115	1110	1104	1098	1091
40	1176	1173	1168	1163	1158	1152	1146	1140
50	1230	1225	1220	1215	1210	1204	1198	1191

## Приложение 8

Температура кипения, теплота испарения и энтальпия пара водно-спиртовых смесей при давлении 10<sup>4</sup> Па

Массовая концентрация спирта в парах, %	Температура конденсации (кипения), °С	Энтальпия жидкости, кДж/кг	Теплота испарения смеси, кДж/кг	Энтальпия пара, кДж/кг
0	100	418,6	2257,8	2676,7
5	99,4	434,7	2186,6	2611,4
10	98,8	426,4	2115,4	2541,9
15	98,2	423,5	2044,2	2467,7

Массовая концентрация спирта в парах, %	Температура конденсации (кипения), °С	Энтальпия жидкости, кДж/кг	Теплота испарения смеси, кДж/кг	Энтальпия пара, кДж/кг
20	97,6	420,8	1972,0	2394,0
25	97,0	420,3	1902,9	2384,5
30	96,0	418,0	1834,7	2251,6
35	95,3	407,1	1763,5	2170,7
40	94,0	397,5	1692,3	2088,2
45	93,2	382,4	1625,3	2007,7
50	91,9	369,4	1554,1	1923,5
55	90,6	356,9	1485,0	1841,9
60	89,6	343,0	1415,8	1758,9
65	87,0	322,9	1346,7	1668,7
70	85,1	306,6	1277,6	1584,3
75	82,8	284,4	1210,6	1495,0
80	80,8	260,0	1143,6	1403,7
85	79,6	250,0	1072,4	1322,4
90	78,7	237,5	996,9	1234,5
95	78,2	222,8	925,8	1148,6
100	78,3	209,8	854,5	1064,4

## Приложение 9

Соотношение объемных и массовых концентраций и плотность водно-спиртовых смесей

Объемная концентрация, %	Массовая концентрация, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Объемная концентрация, %	Массовая концентрация, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Объемная концентрация, %	Массовая концентрация, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
0	0,00	998	21	17,94	972	41	34,19	946
1	0,79	996	22	17,88	971	42	35,09	944
2	1,59	995	23	18,71	970	43	35,99	943
3	2,38	993	24	19,54	969	44	36,89	941
4	3,18	992	25	20,38	968	45	37,80	939
5	3,98	991	26	21,22	966	46	38,72	937
6	4,78	989	27	22,06	965	47	39,69	935
7	5,59	988	28	22,91	964	48	40,56	934
8	6,40	987	29	23,76	963	49	41,49	932
9	7,20	986	30	24,61	962	50	42,43	931
10	8,01	985	31	25,46	961	51	43,37	928
11	8,83	983	32	26,32	959	52	44,31	926
12	9,64	982	33	27,18	958	53	45,26	924
13	10,46	981	34	28,04	957	54	46,22	922
14	11,27	980	35	28,91	955	55	47,18	920
15	12,09	978	36	29,78	954	56	48,15	918
16	12,91	977	37	30,65	952	57	49,13	916
17	13,74	976	38	31,53	951	58	50,11	911
18	14,56	975	39	32,44	949	59	51,10	911
19	15,39	974	40	33,30	948	60	53,09	909
20	16,21	973						

Объемная концентрация, %	Массовая концентрация, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Объемная концентрация, %	Массовая концентрация, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Объемная концентрация, %	Массовая концентрация, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
61	53,09	907	74	66,72	875	87	81,86	838
62	54,09	904	75	67,83	872	88	83,11	835
63	55,11	902	76	68,94	870	89	84,38	832
64	56,13	899	77	70,06	867	90	85,66	829
65	57,15	897	78	71,19	864	91	86,97	825
66	58,19	895	79	72,33	862	92	88,29	822
67	59,23	892	80	73,48	859	93	89,63	819
68	60,27	890	81	74,64	856	94	91,00	815
69	61,33	888	82	75,81	883	95	92,41	811
70	62,39	885	83	77,00	850	96	93,84	807
71	63,40	883	84	78,19	847	97	95,30	803
72	64,54	880	85	79,40	844	98	96,81	799
73	65,63	878	86	80,62	841	99	99,38	794
						100	100,00	789

## Приложение 10

Равновесные составы жидкости и пара и температуры кипения смеси этиловый спирт — вода

Концентрация спирта в жидкости, %		Температура кипения, °C	Концентрация спирта в парах, %	
массовая	молярная		массовая	молярная
0,10	0,04	99,8	1,3	0,51
0,20	0,08	99,6	2,6	1,03
0,40	0,16	99,4	4,9	1,98
0,60	0,23	99,2	7,1	2,90
0,80	0,31	99,0	9,0	3,72
1,00	0,39	98,75	10,75	4,51
3,00	1,19	96,65	27,2	12,75
5,00	2,01	94,96	37,0	18,68
7,00	2,86	93,35	44,6	23,46
9,00	3,73	91,9	50,0	28,12
11,00	4,61	90,8	54,1	31,56
13,00	5,51	89,7	57,4	34,51
15,00	6,46	89,0	60,0	36,98

Концентрация спирта в жидкости, %		Температура кипения, °С	Концентрация спирта в парах, %	
массовая	молярная		массовая	молярная
17,00	7,41	87,9	62,2	39,16
19,00	8,41	87,4	64,3	41,27
21,00	9,42	86,7	65,8	42,94
23,00	10,48	86,3	67,3	44,61
25,00	11,53	85,7	68,6	46,08
27,00	12,64	85,2	69,8	47,49
29,00	13,77	84,8	70,8	48,68
31,00	14,95	84,5	71,7	49,77
33,00	16,15	84,2	72,5	50,78
35,00	17,41	83,75	73,2	51,67
37,00	18,68	83,50	73,8	52,43
39,00	20,00	83,30	74,3	53,09
41,00	21,38	82,95	74,8	53,76
43,00	22,79	82,65	75,4	54,54
45,00	24,25	82,45	75,9	55,22
47,00	25,75	82,30	76,3	55,74
49,00	27,32	82,00	76,8	56,44
51,00	28,93	81,80	77,3	57,12
53,00	30,61	81,60	77,7	57,70
55,00	32,34	81,40	78,3	58,39
57,00	34,16	81,25	78,7	59,10
59,00	36,02	81,10	79,2	59,84
61,00	37,97	80,95	79,7	60,58
63,00	40,00	80,75	80,3	61,44
65,00	42,09	80,60	80,8	62,22
67,00	44,27	80,45	81,3	62,99
69,00	46,55	80,30	81,9	63,91
71,00	48,92	80,10	82,4	64,70
73,00	51,39	79,95	83,1	65,81
75,00	54,00	79,95	82,8	66,93
77,00	56,71	79,70	84,5	68,07
79,00	59,55	79,55	85,4	69,59
81,00	62,52	79,40	86,4	71,4
83,00	65,04	79,30	87,2	72,71
85,00	68,92	78,95	88,3	74,69
87,00	72,36	78,75	89,5	76,93
88,00	74,15	78,65	90,1	78,00
90,00	77,88	78,5	91,3	80,42
92,00	81,82	78,3	92,55	83,15
94,00	85,97	78,2	94,2	86,40
95,57	89,41	78,15	95,57	89,41

## Удельная теплоемкость водно-спиртовых растворов при разных температурах и концентрации спирта

Массовая концентрация спирта, %	Теплоемкость [в кДж/(кг·К)] при температуре, °С							
	30	40	50	60	70	80	90	100
5	4,22	4,22	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27
10	4,27	4,27	4,27	4,31	4,31	4,31	4,31	4,35
20	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31	4,35
30	4,27	4,27	4,39	4,38	4,48	4,52	4,56	4,60
40	4,10	4,10	4,19	4,27	4,31	4,39	4,44	4,48
50	3,85	3,89	4,02	4,10	4,22	4,31	4,39	4,48
60	3,60	3,64	3,85	3,95	4,10	4,22	4,31	4,48
70	3,35	3,39	3,68	3,77	3,93	4,10	4,28	4,44
80	3,14	3,14	3,22	3,43	3,63	3,85	4,06	4,27
90	2,80	2,85	2,93	3,14	3,35	3,55	3,77	3,97
100	2,51	2,59	2,72	2,85	2,97	3,09	3,26	3,43

## Приложение 12

## Термодинамические свойства R12 (хладона)

Температура насыщения, °С	Давление		Плотность, кг/м <sup>3</sup>		Теплота испарения, кДж/кг
	МПа	кг/см <sup>2</sup>	жидкого R12	пара	
-70	0,0122	0,1238	1604	0,888	180,00
-65	0,0170	0,1721	1590	1,189	178,62
-60	0,02270	0,2315	1575	1,564	177,19
-55	0,03006	0,3065	1561	2,028	175,39
-50	0,03922	0,3999	1546	2,595	173,84
-45	0,0510	0,5150	1532	3,279	172,21
-40	0,06424	0,6551	1517	4,097	170,87
-35	0,08079	0,8238	1502	5,069	169,15
-30	0,10047	1,0245	1487	6,200	167,98
-25	0,12369	1,2616	1472	7,513	165,09
-20	0,15098	1,5396	1456	9,034	163,54
-15	0,18262	1,8622	1441	10,79	161,49
-10	0,21910	2,2342	1425	12,80	159,40
-5	0,26087	2,6602	1410	15,08	157,18
0	0,30856	3,1465	1394	17,65	154,88
5	0,36437	3,9659	1378	20,56	152,49
10	0,42301	4,3135	1362	23,79	149,98
15	0,49301	5,0076	1345	27,41	147,34
20	0,5669	5,7786	1329	31,50	144,58
25	0,65273	6,6363	1311	36,07	141,69
30	0,74345	7,5810	1293	41,11	138,63
35	0,84789	8,6264	1274	46,81	135,37
40	0,95816	9,7707	1255	53,13	132,02
45	1,09800	11,0230	1244	60,38	128,42
50	1,21460	12,3860	1213	68,56	124,60

Введение	3
<b>Глава 1. Методические указания к проведению лабораторных занятий</b>	10
Лаборатория процессов и аппаратов пищевых производств	10
Содержание лабораторного практикума	10
Порядок выполнения лабораторных работ	11
Статистическая обработка данных, полученных при выполнении лабораторных работ	13
Меры безопасности	29
<b>Глава 2. Тепловые и массообменные процессы</b>	32
Процесс теплообмена	32
Работа № 1. Исследование зависимости интенсивности и экономичности процесса нагревания от скорости движения жидкости и числа ходов в теплообменном аппарате	41
Работа № 2. Исследование распределения температуры теплоносителей по длине теплообменника	53
Работа № 3. Применение системного анализа к исследованию температурного поля неограниченной пластины в процессе ее нагревания (нестационарный теплообмен)	57
Процесс выпаривания	63
Работа № 4. Испытание многокорпусной выпарной установки	63
Работа № 5. Исследование и оптимизация работы вакуум-аппарата при разных режимах	77
Процесс сушки	86
Работа № 6. Расчет и анализ параметров влажного воздуха	90
Работа № 7. Исследование процесса конвективной сушки пищевых продуктов	102
Работа № 8. Применение системного анализа для определения массообменных характеристик (влажностных коэффициентов) методом снятия кривой сушки	102
Работа № 9. Испытание барабанной сушильной установки	111
Работа № 10. Исследование процесса сублимационной сушки	127
Работа № 11. Исследование процесса сушки инфракрасными лучами	133
Процесс перегонки	133
Работа № 12. Испытание перегонного куба	14
Работа № 13. Испытание ректификационной колонны	14
<b>Глава 3. Гидромеханические и механические процессы</b>	151
Работа № 14. Изучение относительного покоя жидкости во вращающемся сосуде	151
Работа № 15. Тарировка расходомера переменного перепада давления	161
Работа № 16. Определение коэффициента сопротивления по длине и некоторых коэффициентов местных сопротивлений при разных режимах движения жидкости в трубопроводе	170
Работа № 17. Построение характеристик лопастного насоса и апробация разных методов регулирования его работы	178

## Удельная теплоемкость водно-спиртовых растворов при разных температурах и концентрации спирта

Массо- вая кон- цент- рация спир- та, %	Теплоемкость [в кДж/(кг·К)] при температуре, °С							
	30	40	50	60	70	80	90	100
5	4,22	4,22	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27
10	4,27	4,27	4,27	4,31	4,31	4,31	4,31	4,35
20	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31	4,35
30	4,27	4,27	4,39	4,38	4,48	4,52	4,56	4,60
40	4,10	4,10	4,19	4,27	4,31	4,39	4,44	4,48
50	3,85	3,89	4,02	4,10	4,22	4,31	4,39	4,48
60	3,60	3,64	3,85	3,95	4,10	4,22	4,31	4,48
70	3,35	3,39	3,68	3,77	3,93	4,10	4,28	4,44
80	3,14	3,14	3,22	3,43	3,63	3,85	4,06	4,27
90	2,80	2,85	2,93	3,14	3,35	3,55	3,77	3,97
100	2,51	2,59	2,72	2,85	2,97	3,09	3,26	3,43

## Приложение 12

## Термодинамические свойства R12 (хладона)

Температура насыщения, °С	Давление		Плотность, кг/м <sup>3</sup>		Теплота испарения, кДж/кг
	МПа	кг/см <sup>2</sup>	жидкого R12	пара	
-70	0,0122	0,1238	1604	0,888	180,00
-65	0,0170	0,1721	1590	1,189	178,62
-60	0,02270	0,2315	1575	1,564	177,19
-55	0,03006	0,3065	1561	2,028	175,39
-50	0,03922	0,3999	1546	2,595	173,84
-45	0,0510	0,5150	1532	3,279	172,21
-40	0,06424	0,6551	1517	4,097	170,87
-35	0,08079	0,8238	1502	5,069	169,15
-30	0,10047	1,0245	1487	6,200	167,98
-25	0,12369	1,2616	1472	7,513	165,09
-20	0,15098	1,5396	1456	9,034	163,54
-15	0,18262	1,8622	1441	10,79	161,49
-10	0,21910	2,2342	1425	12,80	159,40
-5	0,26087	2,6602	1410	15,08	157,18
0	0,30856	3,1465	1394	17,65	154,88
5	0,36437	3,9659	1378	20,56	152,49
10	0,42301	4,3135	1362	23,79	149,98
15	0,49301	5,0076	1345	27,41	147,34
20	0,5669	5,7786	1329	31,50	144,58
25	0,65273	6,6363	1311	36,07	141,69
30	0,74345	7,5810	1293	41,11	138,63
35	0,84789	8,6264	1274	46,81	135,37
40	0,95816	9,7707	1255	53,13	132,02
45	1,09800	11,0230	1244	60,38	128,42
50	1,21460	12,3860	1213	68,56	124,60

Введение	3
<b>Глава 1. Методические указания к проведению лабораторных занятий</b>	<b>10</b>
Лаборатория процессов и аппаратов пищевых производств	10
Содержание лабораторного практикума	10
Порядок выполнения лабораторных работ	11
Статистическая обработка данных, полученных при выполнении лабораторных работ	13
Меры безопасности	29
<b>Глава 2. Тепловые и массообменные процессы</b>	<b>32</b>
Процесс теплообмена	32
Работа № 1. Исследование зависимости интенсивности и экономичности процесса нагревания от скорости движения жидкости и числа ходов в теплообменном аппарате	41
Работа № 2. Исследование распределения температуры теплоносителей по длине теплообменника	53
Работа № 3. Применение системного анализа к исследованию температурного поля неограниченной пластины в процессе ее нагревания (нестационарный теплообмен)	57
Процесс выпаривания	63
Работа № 4. Испытание многокорпусной выпарной установки	63
Работа № 5. Исследование и оптимизация работы вакуум-аппарата при разных режимах	77
Процесс сушки	86
Работа № 6. Расчет и анализ параметров влажного воздуха	90
Работа № 7. Исследование процесса конвективной сушки пищевых продуктов	102
Работа № 8. Применение системного анализа для определения массообменных характеристик (влагокоэффициентов) методом снятия кривой сушки	109
Работа № 9. Испытание барабанной сушильной установки	115
Работа № 10. Исследование процесса сублимационной сушки	127
Работа № 11. Исследование процесса сушки инфракрасными лучами	133
Процесс перегонки	139
Работа № 12. Испытание перегонного куба	141
Работа № 13. Испытание ректификационной колонны	147
<b>Глава 3. Гидромеханические и механические процессы</b>	<b>159</b>
Работа № 14. Изучение относительного покоя жидкости во вращающемся сосуде	159
Работа № 15. Тарировка расходомера переменного перепада давления	165
Работа № 16. Определение коэффициента сопротивления по длине и некоторых коэффициентов местных сопротивлений при разных режимах движения жидкости в трубопроводе	170
Работа № 17. Построение характеристик лопастного насоса и апробация разных методов регулирования его работы	178
	255

Процесс перемешивания . . . . .	190
Работа № 18. Испытание лопастной мешалки . . . . .	191
Работа № 19. Исследование псевдооживленного слоя твердо- зернистого материала . . . . .	194
Процессы разделения неоднородных систем . . . . .	204
Работа № 20. Испытание циклона . . . . .	206
Работа № 21. Исследование процесса фильтрования и экс- периментальное определение коэффициентов фильтрования на рамном фильтр-прессе . . . . .	210
Работа № 22. Испытание центрифуги периодического дей- ствия . . . . .	215
Работа № 23. Испытание молотковой дробилки . . . . .	220
<b>Глава 4. Техника получения и использования низких температур . . . . .</b>	<b>224</b>
Работа № 24. Испытание хладооной холодильной машины . . . . .	224
Примерные расчеты аппаратов . . . . .	234
Расчет одноходового теплообменного аппарата . . . . .	234
Расчет многоходового теплообменного аппарата . . . . .	236
Расчет сушильной установки . . . . .	238
Расчет коэффициентов фильтрования на рамном фильтр-прессе . . . . .	240
Приложения . . . . .	244

**Бабьев Николай Николаевич**

**Васильева Августина Сергеевна**  
**Гинзбург Абрам Соломонович**  
**Грачев Юрий Павлович**  
**Гребенюк Семен Миронович**

**Журавлев Вячеслав Федорович**

**Лазарев Вячеслав Дмитриевич**  
**Макарова Лариса Алексеевна**  
**Митрофанов Владимир Павлович**  
**Михеева Наталья Семеновна**  
**Савина Ирина Михайловна**

**Сыровдов Виктор Иудович**

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ПРОЦЕССАМ И АППАРАТАМ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Зав. редакцией Л. М. Богатая. Редактор А. П. Серик. Художественный редактор  
В. А. Чуракова. Технический редактор Л. А. Бычкова. Корректор Г. В. Абатурова.

ИБ № 4699

Сдано в набор 27.01.89. Подписано к печати 22.11.89. Т-13045. Формат 60×88<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага кн.-журн. Гарнитура Литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,68.  
Усл. кр.-отт. 15,68. Уч.-изд. л. 16,06. Изд. № 543. Тираж 6 200 экз. Заказ № 457.  
Цена 85 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени ВО «Агропромиздат», 107807, ГСП-6,  
Москва, Б-78, ул. Садовая-Спасская, 18.

Диапозитивы изготовлены в Ярославском полиграфкомбинате Госкомпечати СССР  
150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

Отпечатано в Московской типографии № 8 Государственного комитета СССР по  
печати. 101898, Москва, Хохловский пер., 7. Тип. зак. № 174.

