

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ



КЕМЕРОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
(УНИВЕРСИТЕТ)

Д.М. Бородулин

**ГИДРАВЛИКА.
ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ
ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Лабораторный практикум

*Рекомендовано Федеральным Государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский государственный университет пищевых производств» в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки уровня бакалавриата:
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»;
15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»; 19.03.01 «Биотехнология»;
19.03.02 «Продукты питания из растительного сырья»;
19.03.03 «Продукты питания животного происхождения»;
19.03.04 «Технология продукции и организация общественного питания»; 20.03.01 «Техносферная безопасность»; 29.03.03 «Технология полиграфического и упаковочного производства».*

Регистрационный номер рецензии 469 от 27.08.2015г., ФГАУ «ФИРО»

Кемерово 2015

УДК 664.002.5:532(075)

ББК 65.304.25:30.123я7

Б 85

Рецензенты:

С.В. Шахов, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Машины и аппараты пищевых производств» ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»;

Б.Н. Федоренко, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологическое оборудование пищевых предприятий» ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет пищевых производств»

*Рекомендовано редакционно-издательским советом
Кемеровского технологического института
пищевой промышленности (университета)*

Б 85 Бородулин, Д.М. Гидравлика. Процессы и аппараты пищевых производств: лабораторный практикум / Д.М. Бородулин; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет). – Кемерово, 2015. – 116 с.

ISBN 978-5-89289-924-6

В лабораторном практикуме представлены теория и основные сведения по выполнению лабораторных работ по курсам: «Гидравлика», «Процессы и аппараты пищевых производств» и «Процессы и аппараты биотехнологии». Данный практикум необходим студентам, обучающимся по направлениям: 15.03.02 «Технологические машины и оборудование»; 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»; 20.03.01 «Техносферная безопасность»; 29.03.03 «Технология полиграфического и упаковочного производства»; 19.03.02 «Продукты питания из растительного сырья»; 19.03.03 «Продукты питания животного происхождения»; 19.03.01 «Биотехнология»; 19.04.04 «Технология продукции и организация общественного питания».

ISBN 978-5-89289-924-6

*Охраняется законом об авторском
праве, не может быть использовано
любым незаконным способом
без письменного договора*

УДК 664.002.5:532(075)

ББК 65.304.25:30.123я7

© КемТИПП, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Лабораторная работа № 1. Гидростатическое давление и его свойства. Измерение давления	5
Лабораторная работа № 2. Закон Паскаля. Гидравлический пресс	10
Лабораторная работа № 3. Исследование режимов течения жидкости в круглой трубе	17
Лабораторная работа № 4. Потери напора по длине трубопро- вода. Коэффициент гидравлического трения	22
Лабораторная работа № 5. Исследование процесса осаждения	35
Лабораторная работа № 6. Изучение процесса фильтрации	42
Лабораторная работа № 7. Исследование процесса механического перемешивания жидких сред	51
Лабораторная работа № 8. Определение коэффициента теплопередачи в теплообменном аппарате типа «Труба в трубе»	59
Лабораторная работа № 9. Изучение процесса выпаривания	75
Лабораторная работа № 10. Изучение процесса ректификации	89
Лабораторная работа № 11. Изучение процесса конвективной сушки дисперсных материалов	102
Библиографический список	115

ПРЕДИСЛОВИЕ

Автор выражает огромную благодарность всему коллективу кафедры «Процессы и аппараты пищевых производств» за предоставленные материалы. Отдельное спасибо адресовано доцентам кафедры Сергею Анатольевичу Ратникову и Александру Николаевичу Потапову за помощь в редакции данного практикума, Алексею Анатольевичу Андриюшкову, старшему преподавателю кафедры «Энергосберегающие процессы в химической и нефтегазовой технологиях» КузГТУ, за помощь в создании графических объектов лабораторного практикума.

Лабораторные занятия являются неотъемлемой частью учебного процесса. Основной их целью является закрепление знаний, полученных студентом, и выработка навыков самостоятельной работы с учебно-справочной литературой. Важное условие эффективности таких занятий – непосредственное участие преподавателя в организации постоянной связи со студентом. По возможности занятия должны носить характер творческого диалога между студентом и преподавателем.

Данный лабораторный практикум составлен таким образом, что студент может самостоятельно ознакомиться с основными аспектами гидравлики, а также гидромеханическими, тепловыми и массообменными процессами или закрепить уже имеющиеся знания по данным темам.

Перед началом конкретной лабораторной работы необходимо уяснить ее цель, содержание и последовательность наблюдений и измерений. При вычислениях надо внимательно следить за правильной размерностью величин, подставляемых в формулу. В расчетах следует использовать размерность в международной системе единиц измерений СИ.

Полностью оформленный журнал наблюдений должен быть подписан преподавателем или лаборантом, руководившим ходом лабораторных исследований. Лабораторная работа считается выполненной, если она представлена в полностью оформленном виде, и зачтенной, если основные результаты обоснованы и защищены студентом при устном опросе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ И ЕГО СВОЙСТВА. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Цели работы

1. Определение избыточного давления, вакуума (разрежения) и абсолютного давления воздуха на поверхности жидкости по показаниям U-образного пьезометра;
2. Закрепление знаний в области единиц измерения давления в различных системах (СИ, СГС, МКГСС) и их взаимосвязь;
3. Ознакомиться с расчетом абсолютного гидростатического давления в любой точке покоящейся жидкости.

1. Основные понятия и расчетные формулы

Гидростатическим давлением p называется сила давления жидкости F на единицу площади S , и его можно представить формулой:

$$p = \frac{F}{S}. \quad (1)$$

Гидростатическое давление имеет размерность в системе СИ – Паскаль (Па). Оно обладает тремя свойствами.

Первое свойство. Гидростатическое давление направлено по внутренней нормали к поверхности, на которую оно действует.

Второе свойство. Гидростатическое давление в точке действует одинаково по всем направлениям.

Третье свойство. Гидростатическое давление в точке зависит от её координат в пространстве и может быть записано следующим образом: $p = f(x, y, z)$.

Полное или абсолютное гидростатическое давление в любой точке покоящейся жидкости определяется по основному уравнению гидростатики:

$$p = p_0 + \rho \times g \times h \text{ или } p = p_0 + \gamma \times h, \quad (2)$$

где p – абсолютное (полное) гидростатическое давление;
 p_0 – абсолютное давление на свободной поверхности жидкости;

γ – удельный (объемный) вес жидкости;
 ρ – плотность жидкости;
 g – ускорение свободного падения;
 h – глубина погружения точки под уровень жидкости.

Согласно формуле (1), можно сказать, что расчет абсолютного гидростатического давления сводится к определению абсолютного давления на поверхности жидкости p_0 в соответствующих единицах измерения.

Абсолютное давление – это давление, отсчитанное от абсолютного нуля (полного вакуума), подобно тому, как отсчитывается температура по шкале Кельвина. В технике промышленных измерений давления отсчет ведут от относительного нуля – атмосферного давления. Давление выше атмосферного измеряют манометрами, а называют избыточным или манометрическим. Давление ниже атмосферного (вакуум) измеряют вакуумметрами.

На рис. 1 можно проследить пределы изменения и взаимосвязь абсолютного давления $p_{абс}$, избыточного $p_{изб}$ и вакуума $p_{вак}$.

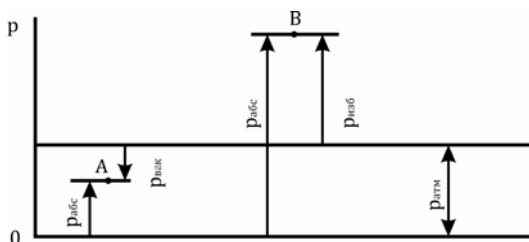


Рис. 1. Взаимосвязь давлений избыточного и абсолютного и давления вакуума.

$$\begin{aligned}
 p_{абс} &= p_{атм} + p_{изб}, \\
 p_{абс} &= p_{атм} - p_{вак}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Абсолютное давление при наличии вакуума (формула 3) называют также остаточным давлением.

В открытых сосудах абсолютное давление на поверхности жидкости равно атмосферному давлению.

Применяемые в гидротехнической практике единицы измерения давления и их взаимосвязь следующие:

$1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ ат (техническая атмосфера)} = 10000 \text{ кгс/м}^2 = 98100 \text{ Н/м}^2 \approx 0,1 \text{ МПа} = 1 \text{ бар}$.

Давление может быть выражено высотой столба жидкости над рассматриваемой точкой. Высота столба жидкости определяется по зависимости:

$$h = \frac{p}{\gamma} = \frac{p}{\rho \times g} \quad (4)$$

Из формулы (3) следует, что одно и то же давление в зависимости от рода жидкости может быть создано столбом различной высоты. Так, техническая атмосфера (1 ат) соответствует 10 м в. ст. (при удельном весе воды $\gamma = 1000 \text{ кгс/м}^3$) = 735,5 мм рт. ст. (при удельном весе ртути 13600 кгс/м^3).

2. Описание экспериментальной установки

Лабораторная установка, представленная на рис. 2, состоит из двух сообщающихся сосудов и U-образного пьезометра. Один из сосудов – открытый 1 (сообщается с атмосферным давлением и может двигаться вниз и вверх). Второй – сосуд 2 (закрытый и неподвижный), имеет кран-воздушник K . Для измерения давления и вакуума предусмотрен U-образный пьезометр 3, соединенный резиновым шлангом с неподвижным сосудом 2.

Если кран K на неподвижном сосуде 2 открыт, внутри него атмосферное давление и положение уровней жидкости в U-образном пьезометре 3 в правом и левом колене одинаковы.

После закрытия крана и перемещения открытого сосуда 1 вверх, над жидкостью в сосуде 2 создается избыточное давление за счет перелива жидкости из сосуда 1 в сосуд 2. Это избыточное давление измеряется разностью уровней жидкости в правом и левом колене U-образного пьезометра (рис. 2а).

При перемещении открытого сосуда 1 вниз и закрытом кране на сосуде 2 из-за перелива части жидкости из него в сосуд 1 в замкнутом пространстве неподвижного сосуда 2 создается вакуум. Величина вакуума измеряется также U-образным пьезометром (рис. 2б).

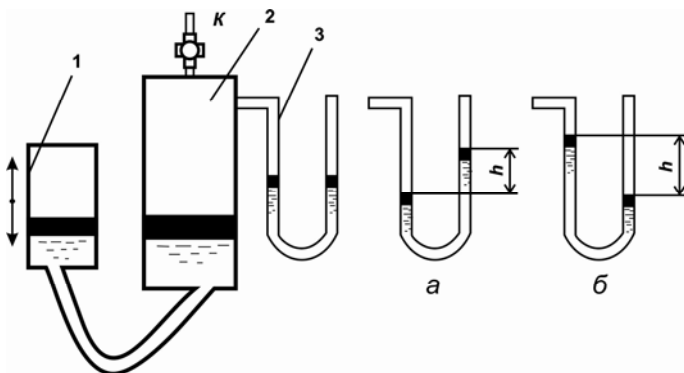


Рис. 2. Схема лабораторной установки для измерения избыточного давления и вакуума:

- 1 – открытый сосуд; 2 – неподвижный сосуд;
3 – U-образный пьезометр

3. Порядок выполнения работы

1. Атмосферное давление необходимо измерить барометром.
2. При открытом кране K установить положение сосудов 1 и 2 в соответствии с рис. 2.
3. Долить воды в U-образный пьезометр до нулевой отметки в обеих трубках. При переливе избыток удалить.
4. Закрыть кран K и создать избыточное давление в замкнутом пространстве сосуда 2. Записать в таблицу 1 величину h (рисунок 2а), характеризующую избыточное давление. Следует провести не менее трех опытов, меняя величину избыточного давления. Опытные данные занести в табл. 1.
5. Перемещая открытый сосуд 1, создать вакуум в замкнутой воздушной области закрытого сосуда 2; измерить его величину по пьезометру 3 (рисунок 2б). Так же, как и в предыдущем случае, следует провести не менее трех опытов, меняя величину вакуума. Опытные данные занести в табл. 2.

4. Обработка опытных данных

Рассчитать абсолютное давление $p_{\text{абс}}$ в замкнутой воздушной области внутри резервуара 1 для всех опытов по формулам (2) и занести в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Расчет абсолютного давления воздуха
по избыточному давлению

Атмосферное давление			Избыточное давление			Абсолютное давление	
мм рт. ст.	$\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	мм в. ст.	$\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$

Таблица 2

Расчет абсолютного давления воздуха при наличии вакуума

Атмосферное давление			Давление вакуума (вакуум)			Абсолютное давление	
мм рт. ст.	$\frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}$	$\frac{\text{Н}}{\text{см}^2}$	мм в. ст.	$\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$

Вопросы для контроля самостоятельной работы

1. Цели лабораторного исследования.
2. Понятие гидростатического давления.
3. Свойства гидростатического давления.
4. Основное уравнение гидростатики.
5. Единицы измерения давления и их взаимосвязь.
6. Понятие абсолютного и избыточного давления, вакуума.
7. Устройство и принцип действия приборов для измерения атмосферного, избыточного давлений, вакуума, перепада давлений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ЗАКОН ПАСКАЛЯ. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЕСС

Цели работы

1. Изучить закон Паскаля.
2. Ознакомиться с принципом действия гидравлического пресса.

1. Общие сведения

В 1663 г. после проведения ряда опытов по измерению атмосферного давления Б. Паскаль решил сконструировать «новую машину для увеличения сил». Его изобретение позволило создать гидравлический пресс (от греческого слова «гидравликос» – водяной). Гидравлический пресс – это машина, приводимая в действие сдавливаемой жидкостью, предназначенная для обработки материалов давлением.

Впервые гидравлические прессы стали применяться на практике в конце XVIII – начале XIX в. Сегодня все чаще и чаще они используются в современной технике, например, в металлообработке дляковки слитков, листовой штамповки, выдавливания труб и профилей, прессования порошковых материалов. С помощью гидравлических прессов получают фанеру, картон и искусственные алмазы.

Современные гидравлические прессы могут развивать силу в десятки и сотни миллионов ньютонов.

Действие гидравлического пресса основано на законе Паскаля, который формулируется так: давление, производимое на жидкость или газ, передается в любую точку без изменений во всех направлениях.

Чтобы понять принцип действия гидравлического пресса, рассмотрим рис. 1. На нем изображены соединенные между собой два цилиндра с поршнями, имеющими разные площади сечения. В цилиндрах находится вода или минеральное масло.

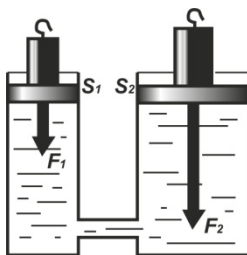


Рис. 1. Схема гидравлического пресса

Допустим теперь, что F_1 и F_2 – силы, действующие на поршни, S_1 и S_2 – площади поршней. Давление под первым (малым) поршнем равно $p_1 = \frac{F_1}{S_1}$, а под вторым (большим) $p_2 = \frac{F_2}{S_2}$. По закону Паскаля давление покоящейся жидкостью во все стороны передается одинаково, т.е. $p_1 = p_2$ или $\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$, откуда:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (1)$$

Отношение F_2/F_1 характеризует выигрыш в силе, получаемый в данной машине. Согласно полученной формуле выигрыш в силе определяется отношением площадей S_2/S_1 . Поэтому, чем больше отношение площадей поршней, тем больше выигрыш в силе.

Например, если площадь большого поршня $S_2 = 500 \text{ см}^2$, а малого $S_1 = 5 \text{ см}^2$, и на малый поршень действует сила 100 Н, то на больший поршень будет действовать сила, в 100 раз большая, т.е. 10 000 Н. Установив этот удивительный факт, Паскаль написал, что с помощью изобретенной им машины «один человек, надавливающий на малый поршень, уравнивает силу ста человек, надавливающих на поршень, в сто раз больший, и тем самым преодолеет силу девяносто девяти человек». Это открытие и легло в основу принципа действия гидравлического пресса.

2. Описание лабораторной установки

Устройство гидравлического пресса показано на рис. 2. Гидравлический пресс имеет две цилиндрических камеры А и Б, которые соединены между собой общей гидросистемой. В цилиндре А установлен плунжер 1 диаметром d , а в цилиндре Б – плунжер 2 диаметром D . Плунжер 1 имеет сальниковое уплотнение, сила трения в котором зависит от усилия затяжки накидной гайки (при нормальной затяжке давление прижатия сальниковой набивки к движущемуся поршню должно быть примерно в 1,3 раза больше максимально возможного давления в гидросистеме). Плунжер 2 уплотнен манжетой. Сила трения при манжетном уплотнении пропорциональна величине давления в гидросистеме, т.к. манжета тем плотнее будет прижиматься к плунжеру 2, чем больше будет давление в гидросистеме пресса.

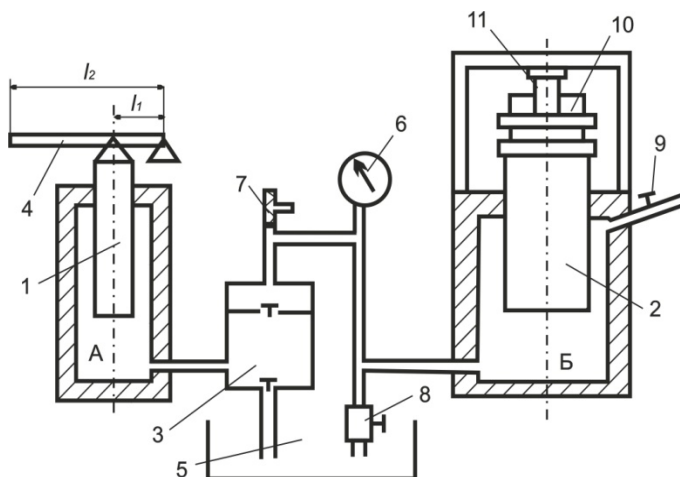


Рис. 2. Лабораторная установка:

- 1 – малый плунжер; 2 – большой плунжер; 3 – клапанная коробка;
4 – рычаг; 5 – ванна; 6 – манометр; 7 – предохранительный клапан;
8 – вентиль; 9 – кран-воздушник; 10 – просечный штамп; 11 – пуансон

Цилиндр А вместе с плунжером 1 и клапанной коробкой 3 образуют поршневой насос, имеющий ручной привод посредством рычага 4. С его помощью за счет всасывающего и нагнетательного клапанов, установленных в клапанной коробке, можно перекачивать рабочую жидкость (масло промышленное) из ванны 5 в полость гидроцилиндра Б. Манометром 6 замеряется давление в гидросистеме пресса. Предохранительный клапан 7 откроется в том случае, если по каким-либо причинам давление в гидросистеме превысит максимальное допустимое значение давления для данного пресса ($p_{max} = 150 \text{ кгс/см}^2$). При этом произойдет слив рабочей жидкости в ванну 5, давление понизится, и разрушения конструкции пресса не произойдет.

После проведения опыта переливной вентиль 8 открывают, рабочую жидкость из камеры Б вручную выдавливают плунжером 2 в ванну 5.

Кран-воздушник 9 служит для удаления воздуха из гидросистемы пресса.

Гидравлический пресс оснащен просечным штампом 10 с пуансоном 11.

Действие гидравлического пресса основано на законе Паскаля. Прессуемое тело помещают в просечный штамп 10, соединенный с плунжером 2. При действии некоторой силы F_1 на плунжер 1 в цилиндре А создается избыточное давление $p = \frac{F_1}{S_1}$. По закону Паскаля это давление передается в цилиндр Б, и на плунжер 2 начинает действовать сила:

$$F_2 = p \times S_2 = \frac{F_1}{S_1} \times S_2 = \frac{S_2}{S_1} \times F_1. \quad (2)$$

Так как площадь цилиндра Б существенно превышает площадь цилиндра А, то сила F_2 оказывается значительно больше силы F_1 . Под действием силы F_2 плунжер 2 начинает подниматься и сдавливать прессуемое тело.

3. Последовательность выполнения работы и расчетов

1. Подготовить пресс к работе. Плунжер 2 должен находиться в крайнем нижнем положении. Переливной вентиль 8

должен быть закрыт. Приоткрыв на пол-оборота кран-воздушник 9, сделать прокачку гидросистемы (5-6 колебательных движений рычага 4). Закрыть кран-воздушник 9.

2. В просечной штамп заложить алюминиевую полоску, предварительно замерив ее толщину δ . Замерить диаметр пуансона d_{II} и вставить его в верхнюю часть штампа. Замерить плечи рычага l_1 и l_2 , диаметр плунжеров 1 и 2 (соответственно d и D) (рисунок 3), результаты занести в таблицу 1.

3. Плавно работая рычагом 4, создать нагрузку на алюминиевую полоску в просечном штампе. Следить за отклонением стрелки манометра от нулевой отметки. В момент разрушения образца зафиксировать давление p по показанию стрелки манометра. Испытание повторить 3-4 раза.

Таблица 1

Основные конструктивные размеры гидравлического пресса
и испытуемого образца

Наименование	Обозначение	Величина
Диаметр малого плунжера	d , м	
Диаметр большого плунжера	D , м	
Длина плеча	l_1 , м	
Длина рукоятки	l_2 , м	
Диаметр пуансона	d_{II} , м	
Толщина алюминиевой полоски	δ , м	

4. Обработка опытных данных

1. Рассчитать силу F нагрузки на алюминиевую пластинку в момент ее разрушения (просечки) с учетом потерь силы давления гидросистемы на преодоление сил трения плунжера 2 о манжетное уплотнение:

$$F = p \times \frac{\pi \times D^2}{4} - \mu \times p \times \pi \times D \times B, \quad (3)$$

где p – давление в гидросистеме пресса в момент просечки пластины, Па;

D – диаметр плунжера, м;

B – ширина уплотнения манжеты, $B = 0,015$ м;

μ – коэффициент трения стали по материалу манжеты, $\mu = 0,08$.

2. Рассчитать усилие f , приложенное к плунжеру 1, в момент просечки образца:

$$f = p \times \frac{\pi \times d^2}{4} + 1,3 \times \mu \times p_{max} \times \pi \times d \times b, \quad (4)$$

где d – диаметр плунжера, м;

b – высота (ширина) сальниковой набивки, $b = 0,008$ м;

p_{max} – максимально возможное давление (150 кгс/см^2) в гидросистеме пресса, на которое рассчитана сила затяжки сальниковой набивки, Па.

3. Определить действительный выигрыш в силе:

$$k_d = \frac{F}{f}. \quad (5)$$

4. Определить теоретический выигрыш в силе:

$$k_t = \left(\frac{D}{d}\right)^2. \quad (6)$$

5. Рассчитать коэффициент полезного действия гидравлического пресса:

$$\eta = \frac{k_d}{k_t} \times 100 \%. \quad (7)$$

6. Рассчитать разрушающее напряжение на срез для алюминиевой пластины:

$$\sigma = \frac{F}{\pi \times d_{II} \times \delta}, \quad (8)$$

где d_{II} – диаметр пуансона просечного штампа, м;

δ – толщина алюминиевой пластины, м.

7. Рассчитать усилие, приложенное к рукоятке рычага:

$$f_p = f \times \frac{l_1}{l_2}, \quad (9)$$

где l_1 – длина плеча, м;
 l_2 – длина рукоятки, м.

Результаты замеров занести в табл. 2.

Таблица 2

Опытные и расчетные данные по изучению работы
гидравлического пресса

Показания манометра, p		Прессующее усилие, F	Усилие на плунжере 1, f	К. П. Д., η	Усилие на рукоятке, f_p	Разрушающее напряжение, σ
бар	Па	Н	Н	%	Н	Па

Вопросы для контроля самостоятельной работы

1. Цели лабораторной работы.
2. Закон Паскаля, его формулировка.
3. Практическое применение закона Паскаля на примере гидравлического пресса.
4. Устройство и принцип действия гидравлического пресса.
5. На примере лабораторных исследований покажите, какой выигрыш получается при использовании гидравлического пресса? Рычага?
6. Определите силы трения в манжетном и сальниковом уплотнениях.
7. Коэффициент полезного действия гидравлического пресса.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

Цель работы

Ознакомиться с режимами течения жидкости в круглой трубе и освоить методику их определения по критерию Рейнольдса.

1. Общие сведения

В 1883 г. английский физик О. Рейнольдс опубликовал результаты своих экспериментальных исследований, наглядно иллюстрирующих существование двух режимов течения жидкости – ламинарного (слоистого) и турбулентного (вихревого). В практике в качестве характеристики режима движения жидкости используют число Рейнольдса, которое обозначают символом Re . Число Рейнольдса представляет собой безразмерный комплекс, характеризующий меру отношения сил инерции и сил трения в потоке жидкости:

$$Re = \frac{w \times d_{\text{э}} \times \rho}{\mu} = \frac{w \times d_{\text{э}}}{\nu} \quad (1)$$

где w – средняя скорость потока жидкости, м/с;

$d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр, м;

μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с;

ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Эквивалентный диаметр равен так называемому учетверенному гидравлическому радиусу $R_{\text{г}}$, характеризующему соотношение площади живого сечения потока S и смоченного периметра Π :

$$d_{\text{э}} = 4R_{\text{г}} = 4 \frac{S}{\Pi}. \quad (2)$$

В результате исследований движения жидкости в гладких трубах круглого сечения на участках, достаточно удаленных от

входа, и при отсутствии различных источников возмущения (вибрация и т.п.) установлено, что если число Рейнольдса меньше значения $Re = 2320$, режим движения будет устойчиво ламинарным. Если число Рейнольдса больше значения $Re = 10000$, режим движения будет устойчиво турбулентным. При числах Рейнольдса $2320 < Re < 10000$ может наблюдаться неустойчиво ламинарный режим или неустойчиво турбулентный режим и взаимный переход от одного вида течения в другой. Этот интервал чисел Рейнольдса ($2320 \div 10000$) называют переходной областью.

Значение числа Рейнольдса, соответствующее переходу от устойчивого ламинарного режима к неустойчивому турбулентному при последовательном увеличении скорости, принято называть нижним критическим числом Рейнольдса ($Re = 2320$), и скорость, при которой достигнуто это число – нижней критической скоростью. Из формулы (1) можно определить нижнюю критическую скорость для любой жидкости и конкретной гладкой круглой трубы:

$$w_{кр.н} = \frac{2320 \times \mu}{d_3 \times \rho}. \quad (3)$$

Соответственно, число Рейнольдса $Re = 10000$, характеризующее переход к устойчивому турбулентному течению при постепенном увеличении скорости течения жидкости в круглой гладкой трубе, называют верхним критическим числом Рейнольдса, а соответствующую скорость – верхней критической скоростью:

$$w_{кр.в} = \frac{10000 \times \mu}{d_3 \times \rho}. \quad (4)$$

Ламинарный режим наблюдается преимущественно при движении жидкости повышенной вязкости (битума, мазута, смазочных масел; из пищевых продуктов – сиропа, расплава карамельной массы и т.п.), а также при движении жидкости в трубах малого диаметра (капиллярах).

В большинстве случаев при движении воды или других жидкостей примерно той же вязкости (близкой к $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) имеет место турбулентный режим движения.

2. Описание опытной установки

Опытная установка, представленная на рис. 1, состоит из напорного бака 1; питательного трубопровода 2 с краником 3; стеклянной трубки 4 с внутренним диаметром равным 38 мм; бачка 5 с подкрашенным раствором той же плотности, что и исследуемая жидкость, из которой выходит трубочка 6 с краником 7; крана 8, регулирующего скорость движения жидкости по трубе 4; мерного бачка 9 с водомерной трубкой 10 и сливной трубой с краном 11. Установка в напорном баке сливной перегородки 12 позволяет поддерживать постоянный уровень жидкости H :

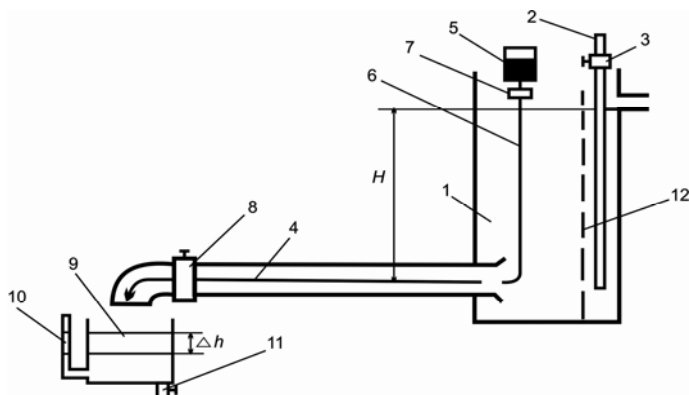


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

- 1 – напорный бак; 2 – питательный трубопровод; 3 – краник;
- 4 – прозрачная труба; 5 – бачок; 6 – трубка; 7 – краник; 8 – кран;
- 9 – мерный бачок; 10 – водомерная трубка; 11 – кран;
- 12 – сливная перегородка

3. Последовательность проведения работы и обработка опытных данных

1. Открыть краник 3 на трубопроводе 2 и наполнить напорный бак 1 водой. При этом уровень воды в баке поддерживается все время постоянным, т.е. непрерывно работает слив.

2. Приоткрыть кран 8. При этом вода начинает поступать из напорного бака 1 в трубу 4, в результате в трубе устанавливается небольшая скорость движения воды.

3. Открывая краник 7 на трубке 6, регулируют поступление краски в стеклянную трубу 4 так, чтобы она вытекала в виде тонкой струйки. Струйчатое движение краски будет свидетельствовать о наличии ламинарного режима в трубе.

4. Объемным способом определить расход воды в трубе 4. Для этого при минимально открытом кране 8 необходимо зафиксировать положение уровня жидкости в мерном бачке 9, одновременно включив секундомер. При истечении $15 \div 30$ с необходимо зафиксировать изменение уровня Δh . Далее аналогично фиксируют Δh при среднем и полном открытии крана 8. Все измерения повторить, наблюдая за состоянием подкрашенной струйки. Полученные значения изменения уровня Δh занести в табл. 1.

4. Обработка опытных данных

Затем можно определить объем, поступившей в мерный бачок воды:

$$V = \Delta h \times S, \quad (5)$$

где S – площадь сечения мерного бачка, а отсюда объемный расход (Q) воды по трубе 4:

$$Q = \frac{V}{\tau} = \frac{\Delta h \times S}{\tau}. \quad (6)$$

5. По найденному расходу воды в трубе Q и площади поперечного сечения трубы $S_{тр}$ определить среднюю скорость:

$$w = \frac{Q}{S_{тр}} = \frac{4 \times Q}{\pi \times d_{тр}^2}. \quad (7)$$

6. По формуле (1) для каждого опыта подсчитать критерий Рейнольдса Re , предварительно определив из табл. 2 плотность и вязкость воды в зависимости от температуры.

7. Рассчитать по формулам (3) и (4) критические скорости – нижнюю и верхнюю, сравнить со средней скоростью и сделать выводы.

Все данные измерений и результаты вычислений занести в соответствующие графы табл. 1.

Таблица 1

Определение режимов течения жидкости

№ опыта	Состояние подкрашенной струйки	Изменение уровня жидкости Δh , м	Объем воды, поступившей в мерный сосуд V , м ³	Время наполнения сосуда τ , с	Расход воды Q , м ³ /с	Средняя скорость w , м/с	Число Рейнольдса Re	Режим движения жидкости
1								
2								
3								

Таблица 2

Теплофизические свойства воды
в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50
$\rho, \text{кг/м}^3$	1000	998	996	992	988
$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$	1,31	1,0	0,804	0,657	0,549
$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	0,575	0,599	0,618	0,634	0,648
$c, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	4190	4190	4180	4180	4180

Вопросы для контроля самостоятельной работы

1. Цель лабораторного исследования.
2. Режимы движения жидкости.
3. Физический смысл критерия Рейнольдса.
4. Кинематический и динамический коэффициенты вязкости, их физический смысл и взаимосвязь.
5. Понятие средней скорости истечения жидкости.
6. Критические значения критерия Рейнольдса, понятие критической скорости.
7. Понятие эквивалентного диаметра потока. Расчет эквивалентного диаметра для различных русел (пример).
8. Методика проведения опытов. Назначение основных элементов лабораторной установки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ПОТЕРИ НАПОРА ПО ДЛИНЕ ТРУБОПРОВОДА. КОЭФФИЦИЕНТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ

Цели работы

1. Определить коэффициенты гидравлического трения в трубопроводе при различных скоростях движения жидкости.
2. Установить зависимость потерь напора по длине трубопровода от средней скорости движения жидкости.

1. Общие сведения

Одним из основных законов гидродинамики является уравнение Д. Бернулли для потока реальной (вязкой) жидкости:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \times g} + \frac{\alpha_1 \times v_1^2}{2 \times g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \times g} + \frac{\alpha_2 \times v_2^2}{2 \times g} + \sum h_{\text{п}}, \quad (1)$$

где z_1, z_2 – геометрическая высота, или геометрический напор (удельная потенциальная энергия положения) для сечений 1 – 1 и 2 – 2, соответственно (см. рис. 1);

$\frac{p_1}{\rho \times g}, \frac{p_2}{\rho \times g}$ – пьезометрическая высота, или пьезометрический напор (удельная потенциальная энергия давления) для соответствующих сечений потока;

$\frac{v_1^2}{2 \times g}, \frac{v_2^2}{2 \times g}$ – скоростная высота, или скоростной напор (удельная кинетическая энергия) для сечений 1-1 и 2-2, соответственно;

α_1, α_2 – безразмерный коэффициент кинетической энергии (коэффициент Кориолиса), учитывающий неравномерность распределения действительных скоростей по сечению русла.

Для элементарной струйки идеальной жидкости уравнение Д. Бернулли имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \times g} + \frac{w_1^2}{2 \times g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \times g} + \frac{w_2^2}{2 \times g} = H = \text{Const}, \quad (2)$$

где H – полный гидродинамический напор (полная удельная энергия) движущейся жидкости.

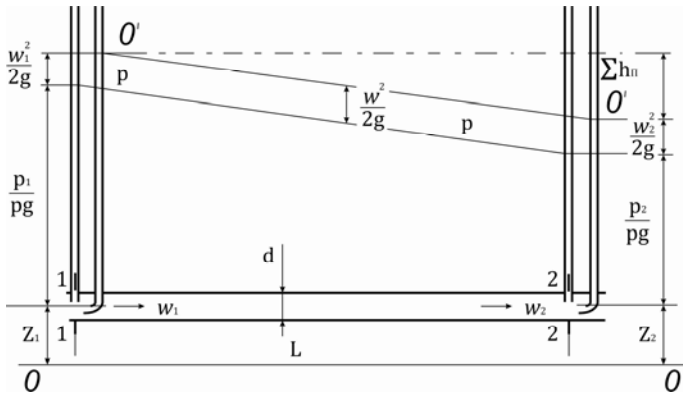


Рис. 1. Графическая иллюстрация уравнения Бернулли для реального потока реальной (вязкой) жидкости

Уравнение (1) отличается слагаемым $\sum h_{\text{п}}$, представляющим собой потери полного напора H (или, как часто называют, падение напора), происшедшими при движении жидкости от сечения 1 – 1 до сечения 2 – 2. Кроме того, скорости, входящие в уравнение (1), являются средними по сечениям 1 и 2 (соответственно v_1 , v_2), а в уравнении (2) – скорости действительные (соответственно w_1 , w_2).

Потери напора (удельной энергии) или, как их часто называют, гидравлические потери зависят от формы, размеров и шероховатости русла (трубы), а также от скорости течения и вязкости жидкости. Гидравлические потери разделяют на:

- местные потери $\sum h_{\text{м.с.}}$, характеризующие затраты энергии на преодоление местных сопротивлений (диафрагм, кранов, поворотов, внезапного сужения или расширения трубопровода и т.п.),
- потери напора по длине на трение $h_{\text{дл}}$.

Полные потери напора определяются как сумма всех видов потерь напора:

$$\sum h_{\pi} = \sum h_{\text{м.с.}} + h_{\text{дл.}} \quad (3)$$

В настоящей лабораторной работе изучаются и рассматриваются потери напора по длине трубопровода и местные потери, вызванные резким поворотом трубопровода на 180° (двойной резкий поворот на 90°).

Местные сопротивления вызывают изменение скорости движения жидкости по величине, направлению или величине и направлению одновременно.

В практических расчетах местные потери определяют по формуле Вейсбаха, выражающей потери напора на местном сопротивлении пропорционально скоростному напору:

$$h_{\text{м.с.}} = \xi \times \frac{w^2}{2 \times g}, \quad (4)$$

где w – средняя скорость движения жидкости в сечении потока за местным сопротивлением, м/с;

ξ – безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом местного сопротивления. Значение ξ устанавливают, как правило, опытным путем.

Исследованию местных сопротивлений посвящено большое число работ, в основном экспериментальных. Установлено, что ξ зависит не только от вида самого местного сопротивления, но и от характера режима движения жидкости, т.е. от критерия Рейнольдса Re . До настоящего времени, однако, вопрос о местных сопротивлениях при ламинарном режиме изучен еще недостаточно полно. Значительно более обстоятельно разработан вопрос о местных сопротивлениях при турбулентном режиме. Установлено, что в этом случае изменения ξ в зависимости от Re незначительны, и при практических расчетах их считают зависящими только от характера и конструктивного оформления местного сопротивления.

Каждое местное сопротивление характеризуется своим значением ξ , которое приближенно считают постоянным для данной формы местного сопротивления. Значения коэффициентов местного сопротивления приводятся в специальной литературе.

В нашем случае при повороте трубопровода на 180° значение коэффициента ξ зависит от диаметра трубопровода d и при $d = 10$ мм, $\xi = 2,0 \dots 2,2$. При резком повороте на 180 градусов, значение коэффициента ξ приближенно можно удвоить (так, как по сути рассматриваются два поворота по 90°), т.е.

$$\xi_{180} = 4 \dots 4,4. \quad (5)$$

Потери на трение по длине $h_{\text{дл}}$ – это потери энергии, которые возникают в прямых трубах постоянного сечения, т.е. при равномерном течении возрастают пропорционально длине трубы:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \times \frac{L}{d} \times \frac{w^2}{2 \times g} \quad (6)$$

или в единицах давления:

$$p_{\text{дл}} = \lambda \times \frac{L}{d} \times \frac{\rho \times w^2}{2}, \quad (7)$$

где L – длина прямолинейного участка трубопровода, м;

d – диаметр трубопровода, м;

λ – безразмерный коэффициент гидравлического трения по длине (коэффициент Дарси).

Формулу (4) обычно называют формулой Дарси – Вейсбаха.

Коэффициент гидравлического трения λ определяется, в общем случае, режимом движения жидкости, т.е. числом Рейнольдса Re и относительной шероховатостью внутренних стенок трубопровода ε :

$$\lambda = f(Re, \varepsilon). \quad (8)$$

В свою очередь, $\varepsilon = \Delta/d$, где Δ – абсолютная эквивалентная шероховатость стенок трубы (средняя высота выступов неровностей внутренней стенки трубы). Высота выступов шероховатости вдоль стенки не постоянна, а сами выступы имеют различную форму. Поэтому для упрощения расчетов вводят понятие эквивалентной шероховатости Δ_e , при которой потери напора в трубе получаются такими же, как и при фактической неоднородной шероховатости. Значения Δ_e для некоторых труб приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения эквивалентной шероховатости для различных труб

Виды труб		$\Delta_э$, мм
Трубы тянутые, из стекла и цветных металлов		0,001...0,002
Трубы тянутые стальные бесшовные	новые	0,01...0,02
	после нескольких лет эксплуатации	0,15...0,3
	после длительной эксплуатации	0,5...2,0
Трубы чугунные	новые	0,2...0,5
	бывшие в эксплуатации	0,5...1,5

Вследствие неравномерного распределения действительных скоростей движения жидкости (от максимального значения на оси потока до нуля у стенок, ограничивающих поток) возле стенок трубы создаются особые условия течения жидкости. Согласно полуэмпирической теории Л. Прандтля даже при турбулентном режиме в непосредственной близости от стенок трубы образуется весьма тонкий слой (его называют вязкий подслой), в котором жидкость движется по законам ламинарного режима течения. Толщину вязкого подслоя δ можно приблизительно рассчитать по следующей формуле:

$$\delta \approx \frac{30 \times d}{Re \times \sqrt{\lambda}}. \quad (9)$$

Таким образом, толщина вязкого подслоя δ относительна и уменьшается с ростом значения критерия Re и коэффициента Дарси.

Если толщина вязкого подслоя δ больше, чем высота выступов шероховатости Δ (т.е. $\delta > \Delta$), то все неровности полностью погружены в вязкий подслой и жидкость в пределах этого подслоя плавно обтекает выступы шероховатости (рис. 2). В этом случае шероховатость стенок трубы не влияет на характер

движения и, соответственно, потери напора не зависят от шероховатости и наблюдается гладкое трение. Такие трубы условно называют гидравлически гладкими.

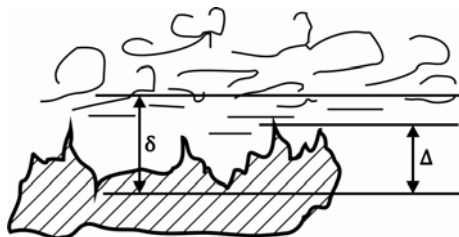


Рис. 2. К понятию видов трения в трубопроводе
(гидравлически гладкая труба)

В противном случае (т.е. $\delta < \Delta$) неровности стенок выходят в пределы турбулентного ядра, что сопровождается интенсивным перемешиванием частиц жидкости (рис. 3). При данных условиях потери напора зависят от шероховатости и при этом наблюдается доквадратичное или квадратичное трение (см. ниже). Такие трубы условно называют гидравлически шероховатыми.

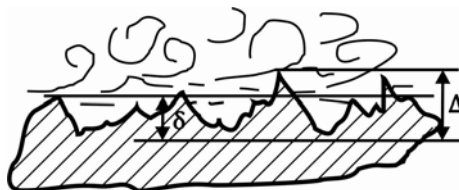


Рис. 3. К понятию видов трения в трубопроводе
(гидравлически шероховатая труба)

При гладком трении коэффициент гидравлического трения λ не зависит от шероховатости стенок ε , а определяется только величиной критерия Рейнольдса. Естественно, при ламинарном режиме движения жидкости в трубе круглого сечения ($Re < 2320$) имеет место лишь гладкое трение и для него справедлива формула Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (10)$$

При турбулентном режиме в зависимости от скорости течения, т. е. числа Re , может быть как гладкое, так и доквадратичное или квадратичное трение.

В условиях гладкого трения, когда $Re \leq 20 \frac{d}{\Delta}$, коэффициент λ зависит только от числа Рейнольдса и определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (11)$$

Если $20 \frac{d}{\Delta} < Re < 500 \frac{d}{\Delta}$, то имеем доквадратичное трение, а коэффициент гидравлического трения λ зависит от Re и от ε и рассчитывается по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (12)$$

Если же $Re \geq 500 \frac{d}{\Delta}$, то для расчета λ используют формулу Б.Л. Шифринсона для квадратичного трения, из которой следует, что λ не зависит от числа Рейнольдса:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}. \quad (13)$$

Кроме этого аналитического способа, численное значение коэффициента гидравлического трения λ можно установить по специальным графикам.

Как следует из формулы Дарси – Вейсбаха (4), потери напора по длине в общем случае можно выразить в функции скорости:

$$h_{дл} = A \times w^m, \quad (14)$$

где A – коэффициент учитывающий влияние размеров трубы и шероховатости ее стенок и вида жидкости;
 m – показатель степени.

При ламинарном режиме движения эта зависимость имеет линейный характер, т.е. $h_{дл} = A_1 \times w^1$ ($m=1$).

При турбулентном режиме движения зависимость потерь напора от скорости будет иной, причем различной для гидравлически гладких и шероховатых труб. Если подставить значение λ из формулы (9) в формулу (4), получим $h_{\text{дл}} = A_2 \times w^{1,75}$, т.е. при гидравлически гладких трубах $m = 1,75$. А если в ту же формулу (4) подставить значение λ из формулы (11), получим $h_{\text{дл}} = A_3 \times w^2$, т.е. при вполне шероховатых трубах потери напора пропорциональны квадрату скорости ($m = 2$).

Таким образом, в одной и той же трубе, при увеличении скорости движения жидкости (а, значит, и критерия Re) от нуля до какого-то максимального значения, характер зависимости потерь напора от скорости будет изменяться от линейного ($m = 1$) до квадратичного ($m = 2$) закона. Кстати, отсюда и появились понятия гладкого ($m = 1$), доквadraticного ($1 < m < 2$) и квадратичного ($m = 2$) трения.

Итак, зная геометрические размеры трубопровода (L , d), материал трубы и степень его износа (Δ), среднюю скорость движения жидкости (w) и её свойства (ρ , μ или ν) можно по формуле Вейсбаха рассчитать потери напора по длине. Но эти же потери можно и замерить с помощью пьезометров или манометров.

Вернемся к уравнению Д. Бернулли (1). Потери напора определяются:

$$\Sigma h_{\text{п}} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho \times g} + \frac{\alpha_1 \times v_1^2}{2 \times g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho \times g} + \frac{\alpha_2 \times v_2^2}{2 \times g} \right). \quad (15)$$

В нашем частном случае, когда рассматривается движение жидкости в горизонтальном ($z_1 = z_2$) трубопроводе постоянного сечения ($v_1 = v_2$) без местных сопротивлений ($\Sigma h_{\text{м.с.}} = 0$ и $\Sigma h_{\text{п}} = h_{\text{дл}}$), уравнение (13) примет вид:

$$h_{\text{дл}} = \left(\frac{p_1}{\rho \times g} - \frac{p_2}{\rho \times g} \right). \quad (16)$$

Таким образом, потери напора по длине в горизонтальном трубопроводе постоянного сечения могут быть определены как разность показаний пьезометров (манометров), установленных в начале и конце исследуемого трубопровода.

Отметим особо, что для определения полного напора необходимо к пьезометрическому напору (показания пьезометра) добавить величину скоростного напора $\frac{v^2}{2 \times g}$ (разность показаний трубки Пито и пьезометра).

2. Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки показана на рис. 4.

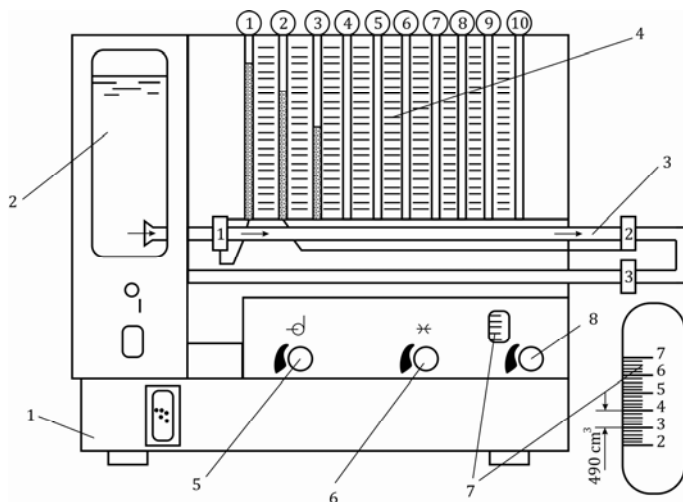


Рис. 4. Схема лабораторной установки:

- 1 – бак; 2 – напорный резервуар; 3 – трубопровод; 4 – панель;
5 и 6 – регулировочные краны; 7 – водомерное окно;
8 – сливной кран

Лабораторная установка состоит из бака 1, служащего одновременно основанием установки. Жидкость насосом (на рисунке не показан) подается в напорный резервуар 2, из которого поступает в трубопровод 3 (внутренний диаметр 10 мм, длина 1 м). Для измерения величины напора установка оснащена пьезометрическим щитом (панелью) 4, на котором установлены пьезометры (10 штук) и мерная шкала.

Подача жидкости из бака 1 в напорный резервуар 2 регулируется краном 5. Расход жидкости, а, значит, и скорость ее движения в исследуемом трубопроводе регулируется краном 6. Для определения расхода и скорости движения жидкости объемным методом установка снабжена мерным бачком с водомерным окном 7. Жидкость из мерного бачка сливается при открытии сливного крана 8.

3. Порядок выполнения работы

1. При закрытом кране 6 в напорный резервуар 2 с помощью насоса подайте воду из бака 1, обеспечив заданный уровень (выполняется лаборантом или преподавателем).

2. Медленно открывая кран 6, следите за показаниями пьезометров (1), (2) и (3), которые присоединены, соответственно, в начале и в конце исследуемого трубопровода. Добившись снижения уровня жидкости в пьезометре (2) на 15–20 мм и создав установившееся движение, что можно определить по отсутствию колебания жидкости в пьезометрах, можно приступать к необходимым измерениям.

3. Замерьте показания пьезометров (1), (2) и (3). Результаты занесите в табл. 2.

Таблица 2

Показания первого и второго пьезометров

№ опыта	Показатели пьезометров, м			Потери напора по длине (опыт), м	Потери напора при резком повороте (опыт), м
	$p_1/\rho g$	$p_2/\rho g$	$p_3/\rho g$	$h_{дл}$	$h_{пов}$
1					
2					
3					
...					
...					
9					
10					

4. Для определения расхода Q закройте кран 8 и, включив секундомер, замерьте время τ , за которое в мерный бачок поступит жидкость объемом W (около 1000 см³).

5. Увеличивая степень открытия крана 6 и добившись снижения уровня жидкости в пьезометрах (2) и (3) на 15–20 мм по сравнению с предыдущим опытом, произведите аналогичные замеры. Всего рекомендуется выполнить не менее 8 – 10 опытов. Полученные экспериментальные данные занесите в табл. 3.

Таблица 3

Экспериментальные данные

№	Мерный объем	Время отбора	Расход	Средняя скорость	Критерий Рейнольдса	Коэффициент местного сопротивления	Коэф-фициент Дарси	Потери напора по длине (расчет)
	W	τ	Q	w	Re	ξ_{180}	λ	$h_{дл}^T$
	м ³	с	м ³ /с	м/с	—	—	—	м
1								
2								
3								
...								
...								
9								
10								

4. Обработка опытных данных

1. По разности показаний пьезометров определите потери напора по длине трубопровода и при его резком повороте на 180°:

$$h_{дл} = \left(\frac{p_1}{\rho \times g} - \frac{p_2}{\rho \times g} \right); \quad (17)$$

$$h_{\text{пов}} = \left(\frac{p_2}{\rho \times g} - \frac{p_3}{\rho \times g} \right). \quad (18)$$

Полученные результаты занесите в табл. 2.

2. Рассчитайте расход жидкости:

$$Q = \frac{W}{\tau}. \quad (19)$$

3. Рассчитайте среднюю скорость движения жидкости:

$$w = \frac{Q}{S} = \frac{4 \times Q}{\pi \times d^2}, \quad (20)$$

где S – площадь живого сечения потока, м.

4. Определите коэффициент местного сопротивления для резкого поворота трубопровода на 180° :

$$\xi_{180} = \frac{h_{\text{пов}} \times 2g}{w^2}. \quad (21)$$

5. Рассчитайте критерий (число) Рейнольдса, предварительно определив вязкость и плотность воды по табл. 4:

$$Re = \frac{w \times d \times \rho}{\mu} = \frac{w \times d}{\nu}. \quad (22)$$

Таблица 4

Физические свойства воды в зависимости от температуры

$t, ^\circ C$	10	20	30
$\rho, \text{кг/м}^3$	1000	998	996
$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$	1,31	1,0	0,804

6. В зависимости от рассчитанного значения критерия (числа) Рейнольдса и известной шероховатости трубы определите, по какой из формул (10, 11, 12, 13) необходимо рассчитать коэффициент гидравлического трения λ .

7. Рассчитайте потери напора по длине (теоретические) $h_{\text{дл}}^T$ с помощью формулы Дарси – Вейсбаха (6), подставляя значение λ , рассчитанное в п. 6.

8. Опытные и расчетные данные занесите в табл. 3.
 9. Постройте графики зависимости потерь напора по длине от средней скорости:
 - по опытным данным $h_{\text{дл}} = f(v)$;
 - по расчетным формулам $h_{\text{дл}}^T = f(v)$.
- Сопоставьте полученные графики. Сделайте выводы.

Вопросы для контроля самостоятельной работы

1. Цель лабораторной работы.
2. Уравнение Д. Бернулли для идеальной и реальной жидкости.
3. Геометрический и энергетический смысл уравнения Д. Бернулли.
4. Виды потерь напора.
5. Виды местных сопротивлений.
6. Формула Вейсбаха, определяющая местные потери напора.
7. Гидравлически гладкие и гидравлически шероховатые трубы.
8. Формула Дарси – Вейсбаха.
9. Коэффициент гидравлического трения, от чего зависит его значение.
10. Понятие гладкого, доквадратичного и квадратичного трения.
11. Профиль скоростей по сечению русла. Понятие средней скорости.
12. Объемный способ измерения средних скоростей движения жидкости.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ

Цели работы

1. Экспериментальное изучение скорости осаждения твердых частиц под действием силы тяжести в зависимости от рода вещества частицы, размеров частицы и физических свойств жидкости.

2. Сравнение полученных данных с имеющимися в литературных источниках.

1. Основы теории и постановка задачи исследования

Рассмотрим процесс падения шарообразной частицы твердого материала в неподвижной жидкой среде и выведем уравнения скорости осаждения частицы. На рис. 1 схематично представлены силы, действующие на падающую частицу. Для частицы диаметром d и плотностью $\rho_{\text{ч}}$ сила тяжести, направленная вертикально вниз, равна:

$$G = \frac{\pi \times d^3}{6} \times \rho_{\text{ч}} \times g, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения.

Согласно закону Архимеда подъемная сила равна:

$$A = \frac{\pi \times d^3}{6} \times \rho_{\text{ж}} \times g, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости.

Сила, заставляющая частицу падать, составляет:

$$G - A = \frac{\pi \times d^3}{6} \times (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) \times g. \quad (3)$$

При осаждении частица испытывает сопротивление, которое зависит от вязкости жидкой среды, её плотности, площади сечения частицы, нормального к направлению падения частицы и от формы частицы.

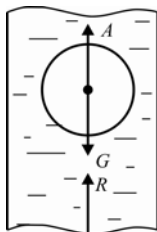


Рис. 1. Система сил, действующих на осаждающуюся частицу

Величина силы R определяется по уравнению:

$$R = \frac{C \times F \times \rho_{\text{ж}} \times w_{\text{ос}}^2}{2}, \quad (4)$$

где C – коэффициент сопротивления среды, зависящий от режима движения частицы;

F – площадь сечения частицы;

$w_{\text{ос}}$ – скорость осаждения частицы.

При осаждении частица вначале движется ускоренно; однако участок ускоренного движения невелик, сила $(G - A)$ становится равной силе сопротивления R , поэтому далее частица начинает двигаться равномерно со скоростью $w_{\text{ос}}$. Эта величина может быть найдена из условия $(G - A) = R$, или

$$\frac{\pi \times d^3}{6} \times (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) \times g = C \times \frac{\pi \times d^2}{4} \times \rho_{\text{ж}} \times \frac{w_{\text{ос}}^2}{2}. \quad (5)$$

Решая это уравнение относительно $w_{\text{ос}}$, получим:

$$w_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{4 \times g \times d \times (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}{3 \times \rho_{\text{ж}} \times C}}. \quad (6)$$

Полученное выражение для расчета скорости осаждения включает коэффициент сопротивления C , который зависит от гидравлического режима осаждения. Исследования показывают, что существуют три режима осаждения: ламинарный, переходный и турбулентный. Область существования режимов осаждения определяется величиной критерия Рейнольдса, который для падающей частицы рассчитывается по формуле:

$$Re = \frac{w_{oc} \times d \times \rho_{ж}}{\mu}, \quad (7)$$

где μ – вязкость жидкости, Па $\times$ с.

Значения коэффициента C находят в зависимости от величины Re по уравнениям, приведённым в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика режимов осаждения

Значение Re	Уравнения для расчета	Характеристика режима
$Re \leq 2$	$C = 24/Re$	Ламинарный
$500 \leq Re < 2$	$C = \frac{18,5}{Re^{0,6}}$	Переходный
$Re > 500$	$C = 0,44$	Турбулентный

Для определения режима осаждения и, следовательно, выбора формулы для расчёта C , а затем и скорости осаждения w_{oc} надо знать величину критерия Re , в который, однако, также входит w_{oc} . В связи с этим расчёт w_{oc} возможен методом последовательных приближений.

Для этого необходимо сначала задаться режимом осаждения, затем определить w_{oc} , а по найденному значению w_{oc} определить режим осаждения и проверить, правильно ли был выбран режим.

Для уменьшения объёма вычисленных операций можно воспользоваться методом, предложенным П.В. Лященко. Этот метод основан на преобразовании уравнения:

$$w_{oc} = \sqrt{\frac{4 \times g \times d \times (\rho_{ч} - \rho_{ж})}{3 \times \rho_{ж} \times C}}. \quad (8)$$

После подстановки в него скорости осаждения, выраженной через критерий Re , возведения обеих частей уравнения в квадрат и несложного преобразования получим:

$$C \times Re^2 = \frac{4}{3} \times \frac{d^3 \times g \times \rho_{\text{ж}} \times (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}{\mu^2}. \quad (9)$$

Правая часть этого уравнения представляет собой видоизменённый критерий Архимеда. Поэтому можно записать:

$$C \times Re^2 = \frac{4}{3} \times Ar. \quad (10)$$

$$Ar = \frac{d^3 \times g \times \rho_{\text{ж}} \times (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}{\mu^2}. \quad (11)$$

Критерий Архимеда показывает отношение подъемной силы к силе вязкостного трения (сопротивления) жидкости.

Критерий Ar не содержит значения w_{oc} , поэтому ее можно определить из выражения (10).

Так как величина коэффициента C зависит от режима осаждения, то можно установить граничные значения критерия Архимеда, соответствующие переходу одного режима осаждения в другой режим.

В ламинарном режиме ($Re \leq 2$) $Re = Ar/18$. Критическое значение критерия Ar , соответствующее $Re = 2$, будет $Ar = 36$; следовательно, существование ламинарного режима осаждения ограничивается условием $Ar < 36$. В переходной области $Re = 0,152 \times Ar^{0,715}$. Критическое значение критерия Архимеда, соответствующее значению $Re = 500$, будет $Ar = 83000$. Следовательно, существование переходного режима ограничивается изменением критерия Архимеда в пределах $36 < Ar \leq 83000$. В турбулентном режиме $Re = 1,74 \times Ar^{0,5}$, а критерий Архимеда $Ar > 83000$.

Критериальные зависимости процесса осаждения:

$$\text{для ламинарного режима осаждения } Re = Ar/18; \quad (12)$$

$$\text{для переходной области осаждения } Re = 0,152 \times Ar^{0,715}; \quad (13)$$

$$\text{для турбулентного режима осаждения } Re = 1,74 \times Ar^{0,5}. \quad (14)$$

2. Описание установки

Схема лабораторной установки показана на рис. 2.

Установка состоит из трех цилиндров, заполненных различными жидкостями: водой, трансформаторным маслом и глицерином. Каждый цилиндр снабжен метками, позволяющими фиксировать расстояние (равное 1 м), которое частицы проходят в процессе осаждения, причём верхняя метка расположена на расстоянии 30 – 40 мм ниже уровня жидкости, чтобы исключить влияние начального участка. Для проведения работы используется набор шариков различных размеров, изготовленных из стекла, металлов, пластмасс, а также секундомер и микрометр.

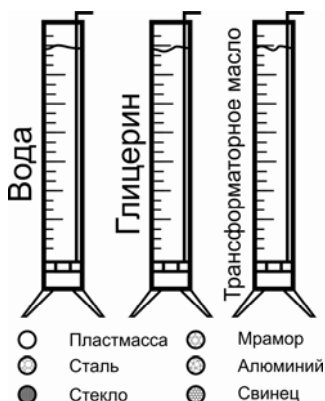


Рис. 2. Схема лабораторной установки

3. Методика проведения работы

1. Подбираются шарики из различных материалов с разным диаметром.
2. Микрометром измеряется диаметр каждого шарика, результаты замера заносятся в табл. 2.
3. Шарики берут пинцетом, осторожно вводят на поверхность жидкости и отпускают. Секундомером фиксируют время прохождения шариком отмеченного расстояния. Опыты проводятся при использовании в качестве сплошной среды различных

жидкостей. Рекомендуется проводить не менее 15 опытов. Если шарик коснулся стенок сосуда или к нему прилип пузырёк воздуха, то такой опыт не учитывается и производится заново.

Таблица 2

Опытные и некоторые расчетные величины

Название жидкости	Частицы		Расчетные величины					
	Материал	Диаметр, м	Время осаждения, с	Скорость, м/с	Критерий Архимеда	Критерий Рейнольдса		Погрешность, %
		d	τ	w_{oc}	Ar	Re_z	Re_T	Δ
1	2	3	4	5	6	7	8	9

4. Обработка опытных данных

Необходимые для расчётов данные физических свойств жидкостей и шариков следует выбирать из табл. 3 и 4.

Таблица 3

Физические свойства жидкостей при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Название	Плотность ρ , кг/м ³	Вязкость, $\nu \times 10^6$, м ² /с
Глицерин	1245	300
Трансформаторное масло	885	40
Вода	998,2	1,006

Таблица 4

Плотность материала шариков

Материал	Плотность ρ , кг/м ³
Пластмасса	1060
Сталь	7800
Свинец	11330
Стекло	2500
Алюминий	2700
Мрамор	2400

1. Подсчитывают скорость осаждения в каждом замере, исходя из длины пути и измеренного времени осаждения.

2. Подсчитывают для каждого опыта значения критериев Архимеда Ar и Рейнольдса Re_z по формулам (11) и (7).

3. Рассчитывают значения критериев Re_T по формулам (12) – (14) в зависимости от режима осаждения.

4. По найденным значениям Re_T и Re_z рассчитывают погрешность между теоретическими и расчетными данными $\Delta = \frac{Re_T - Re_z}{Re_T} \times 100 \%$. Результаты вычислений заносят в табл. 2.

По полученным результатам сделайте выводы.

Вопросы для контроля самостоятельной работы

1. Неоднородные системы, их классификация.
2. Методы разделения неоднородных систем.
3. Какой фактор характеризует процесс разделения?
4. Факторы, влияющие на скорость осаждения частиц в гравитационном поле.
5. Влияние формы частиц и концентрации суспензии на процесс гравитационного осаждения.
6. Расчетные формулы для определения коэффициента сопротивления среды.
7. Формула Стокса для расчёта скорости осаждения частиц.
8. Методика проведения эксперимента.
9. Расчет критериев Рейнольдса, Архимеда.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ

Цели работы

1. Закрепление знаний в области кинетики фильтрования.
2. Определение констант фильтрования, входящих в основное уравнение процесса.
3. Определение производительности фильтра по фильтрату и осадку.

1. Основы теории и постановка задачи исследования

Фильтрованием называется процесс разделения суспензии и газовзвесей при помощи пористых или фильтровальных перегородок, задерживающих твердые частицы (дисперсную фазу), но пропускающих сплошную фазу (жидкость, газ). Осевший на перегородке слой твердых частиц называют осадком, а прошедшую через нее жидкость – фильтратом.

В простейшем виде аппарат для фильтрования, называемый фильтром, представляет собой вертикальный сосуд, разделённый горизонтальной перегородкой на две части. В верхнюю часть подаётся суспензия, которая фильтруется через перегородку, а полученный фильтрат стекает в нижнюю часть сосуда. Движущей силой процесса фильтрования является разность давлений по обе стороны фильтровальной перегородки. Эта разность давления создаётся различными способами: массой столба самой суспензии, нагнетанием насосами, вакуумированием пространства под фильтровальной перегородкой, при помощи центробежной силы.

Выбор конструкции фильтра зависит от структуры осадка. Необходимо иметь в виду, что плохо фильтруются аморфные сжимаемые осадки. Хорошо фильтруются кристаллические несжимаемые осадки. Для кристаллических несжимаемых осадков применяются главным образом вакуум-фильтры непрерывного действия. Для аморфных сжимаемых осадков применяют рамные фильтр-прессы периодического действия. Последние фильтры позволяют

вести разделение плохо фильтрующихся суспензий благодаря применению больших перепадов давления ($\Delta P = 3 \div 12$ атм), чем при вакуум-фильтрации ($\Delta P = 0,6 \div 0,9$ атм).

Важнейшей частью любого фильтра является фильтровальная перегородка, которая должна задерживать твердые частицы и легко отделяться от них, обладать достаточной механической прочностью, низким гидравлическим сопротивлением и химической стойкостью. В зависимости от дисперсности твердой фазы и вязкости жидкой фазы суспензий на практике могут применяться фильтровальные перегородки из хлопчатобумажных тканей (бельтинг, бязь), шерстяных тканей (сукно, байка, войлок), тканей из синтетических волокон и из волокна минерального происхождения, асбеста, металлических сеток, керамических плиток.

По механизму процессы промышленного фильтрования могут быть разделены на две группы: фильтрование с образованием осадка и фильтрование с закупориванием пор.

По первому механизму фильтруются обычно маловязкие суспензии с большим содержанием твердой фазы. При этом взвешенные частицы создают в устьях пор фильтрующей перегородки своды из частиц, которые предохраняют поры от засорения; образуется осадок, толщина которого увеличивается по мере фильтрования. После образования слоя осадка он начинает играть основную роль в задерживании остальных частиц осадка. К этому типу фильтрования относится, например, фильтрование сока сатурации на свеклосахарных заводах, фильтрование заторов и дрожжевой массы на пивоваренных заводах.

Второй тип фильтрования имеет место, когда размеры частиц очень малы и их количество невелико, а также при фильтровании вязких суспензий. В этих случаях фильтрование протекает медленно, твердые частицы проникают в поры и постепенно закупоривают их.

Возможен и промежуточный вид фильтрования, при котором твердые частицы проникают в поры фильтровальной перегородки и остаются на ее поверхности.

При изучении фильтрования основной задачей является определение производительности фильтра и расхода энергии на

фильтрация. Данные параметры зависят от структуры осадка, концентрации суспензии, температуры, гидравлического сопротивления фильтрующей перегородки и движущей силы процесса. Очевидно, что производительность фильтра определяется скоростью фильтрации. Под скоростью фильтрации w понимают объем фильтрата, проходящего через 1 м^2 фильтрующей перегородки в единицу времени. Скорость фильтрации зависит от следующих факторов: разности давлений с обеих сторон фильтровальной перегородки, толщины слоя осадка, свойств осадка и суспензии, температуры жидкости. В общем виде основное уравнение процесса фильтрации можно записать так:

$$w = \frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta P}{R_{\phi}}, \quad (1)$$

где dV – производительность фильтра по фильтрату за единицу времени, $\text{м}^3/\text{м}^2$;

$\frac{dV}{d\tau}$ – скорость фильтрации, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \times \text{с})$;

ΔP – движущая сила процесса фильтрации, $\text{Н}/\text{м}^2 = \text{Па}$;

R_{ϕ} – сопротивление процессу фильтрации, $\text{Н} \times \text{с}/\text{м}^3$.

В зависимости от величины ΔP фильтрация имеет различный характер.

1. Если $\Delta P = \text{const}$, то по мере накопления осадка на фильтре скорость фильтрации $dV / d\tau$ убывает; такой процесс фильтрации называют нестационарным.

2. Если с увеличением толщины слоя осадка h соответственно увеличивают ΔP , так что градиент давления $\Delta P / h$ в слое остается постоянным, то скорость фильтрации будет также величиной постоянной ($dV / d\tau = \text{const}$); такой процесс фильтрации называют стационарным.

В промышленности наиболее распространено нестационарное фильтрация, скорость которого является величиной переменной и поэтому выражается в дифференциальной форме.

Сопротивление фильтрации R_{ϕ} складывается из сопротивления осадка R_{OC} и сопротивления фильтрующей перегородки $R_{\phi.л.}$:

$$R_{\phi} = R_{oc} + R_{\phi.п.} \quad (2)$$

Так как сопротивление осадка R_{oc} пропорционально количеству отложившегося осадка, то оно пропорционально и удельному объёму прошедшего фильтрата V :

$$R_{oc} = K' \times V, \quad (3)$$

где K' – коэффициент пропорциональности.

Сопротивление фильтровальной перегородки $R_{\phi.п.}$ можно заменить сопротивлением слоя осадка, оказывающего такое же сопротивление процессу фильтрования, какое оказывает фильтровальная перегородка и выразить через соответствующее количество фильтрата C :

$$R_{\phi.п.} = K' \times C. \quad (4)$$

С учетом формул (3) и (4) формула (2) примет вид: $R_{\phi} = K' \times (V + C)$. Подставив полученное значение R_{ϕ} в уравнение (1), получим:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta P}{K'(V+C)}. \quad (5)$$

При нестационарном фильтровании $\Delta P = const$, поэтому отношение $\Delta P/K'$ можно обозначить постоянной K [m^2/c], с учетом этого получается:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{K}{2(V+C)}. \quad (6)$$

Интегрирование этого уравнения дает следующее выражение:

$$V^2 + 2V \times C = K \times \tau, \quad (7)$$

$$K = \frac{2 \times \Delta P}{K'} = \frac{2 \times \Delta P}{\mu \times r_0 \times x_0}, \quad (8)$$

$$C = \frac{R_{\phi.п.}}{r_0 \times x_0}, \quad (9)$$

где μ – вязкость фильтрата, $H \times c/m = Pa \times c$;

r_0 – удельное сопротивление слоя осадка, Н/м² = Па;
 x_0 – концентрация суспензии;
 V – объем фильтрата, прошедшего через 1 м² фильтровальной перегородки, м³/м² = л/м²;
 τ – время фильтрования, мин;
 C – константа фильтрования, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки, м³/м² = л/м²;
 K – константа фильтрования, учитывающая режим фильтрования и физико-химические свойства осадка и фильтрата, м⁶/(м⁴×мин) = л⁶/(м⁴×мин).

Подставив формулы (6) и (7) в (5) получим уравнение фильтрования для нестационарного процесса:

$$V^2 + 2 \times \frac{R_{\text{ф.п.}}}{r_0 \times x_0} \times V = 2 \times \frac{\Delta P}{\mu \times r_0 \times x_0} \times \tau. \quad (10)$$

В данной работе предлагается изучить процесс нестационарного фильтрования.

2. Описание установки

Схема лабораторной установки показана на рис. 1.

Установка состоит из воронки 2 с перфорированным дном, на которое укладывается фильтр 1, приемник для фильтрата 3, вакуумметра 4.

Элементы установки соединены между собой вакуумными резиновыми трубками. На верхней трубке установлен кран 5, позволяющий начать и прервать процесс фильтрования. Под приемником для фильтрата на нижней трубке установлен кран 6, при помощи которого осуществляется слив фильтрата.

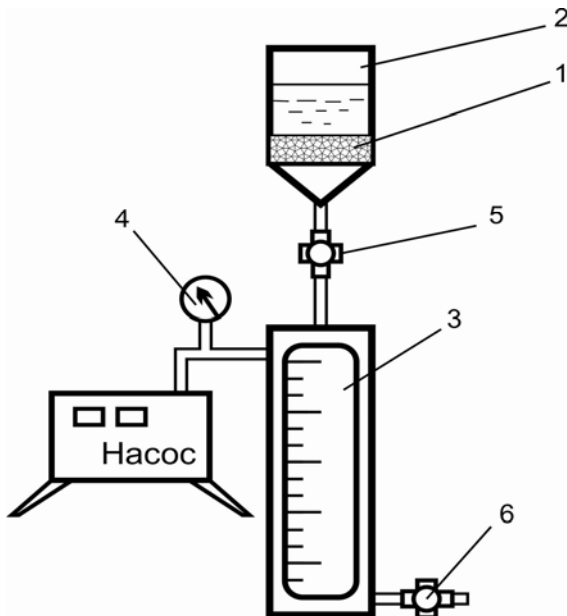


Рис. 1. Схема лабораторной установки:
1 – фильтр; 2 – воронка; 3 – приёмник фильтрата;
4 – вакуумметр; 5 – кран; 6 – сливной кран

3. Методика проведения работы

1. Приготавливают 0,5 литра суспензии из молотого мела и воды с определённой концентрацией мела (или крахмала), указанной преподавателем. Во избежание осаждения мела суспензию перемешивают (взбалтывают).

2. Проверяют готовность установки к работе. Включают вакуум-насос, устанавливая заданную преподавателем величину вакуума по вакуумметру 4.

3. Наливают при перемешивании суспензию в воронку 2, затем медленно открывают кран 5 и одновременно включают секундомер. В ходе фильтрования поддерживают заданное значение вакуума. Приемник имеет шкалу для определения объема

накопившегося фильтрата. Поэтому в ходе выполнения работы нужно проводить замеры времени в моменты, когда уровень фильтрата в приемнике соответствует делениям шкалы. Все замеры времени и объемов фильтрата производят, не выключая секундомера и считая их от начального момента фильтрования. Результаты измерений заносят в табл. 1.

Таблица 1

Опытные и расчетные величины

№	Время замера τ , с	Объемы фильтрата			Интервалы		$\frac{dV}{d\tau}$, $\frac{с \times м^3}{м^2}$
		V_{ϕ} , см ³	V_{ϕ} , м ³	V , м ³ /м ²	Времени $\Delta\tau$, с $\Delta\tau = \tau_n - \tau_{n-1}$	Объемов фильтрата $\Delta V_n = V_n - V_{n-1}$, м ³ /м ²	
1							
2							
...							
11							

4. По окончании фильтрования закрывают кран 5 и одновременно выключают секундомер и вакуум-насос. Затем линейкой измеряют толщину слоя осадка на фильтре и его диаметр.

5. После окончания работы фильтр промывают водой и вытирают сухой тряпкой. Открыв кран 6, фильтрат из приемника выливают в канализацию. Приемник фильтрата промывают чистой водой, затем собирают фильтровальную установку.

4. Обработка опытных данных

1. Определяем объем фильтрата V , отнесенный к поверхности фильтруемой перегородки F , по формуле:

$$V = \frac{V_{\phi}}{F}, \quad (11)$$

где V_{ϕ} – объем фильтрата, собранный за время опыта, м³.

$$F = \frac{\pi \times d_{\phi}^2}{4}, \quad (10)$$

где d_{ϕ} – диаметр фильтра, м.

Полученные результаты заносят в табл. 1.

2. На миллиметровой бумаге строят график зависимости $V_{\phi} = f(\tau)$.

3. На графике выбирают два произвольных значения времени τ_1 и τ_2 и соответствующие им значения V_1 и V_2 . Решая систему уравнений:

$$\begin{cases} V_1^2 + 2V_1 \times C = K \times \tau_1 \\ V_2^2 + 2V_2 \times C = K \times \tau_2 \end{cases}, \quad (11)$$

находят значения констант фильтрования C и K .

4. Далее определяют скорость фильтрования в начальный ($\tau = 0$; $V = 0$) и конечный (τ_{max} ; V_{max}) моменты процесса по формулам:

$$\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_H = \frac{K}{2 \times C}; \quad (12)$$

$$\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_K = \frac{K}{2 \times (V_{max} + C)}. \quad (13)$$

5. Определяют часовую производительность фильтра по фильтрату и влажному осадку по формулам:

$$V_{\phi} = \frac{V_n \times 3600}{F \times \tau_n}; \quad (14)$$

$$V_{oc} = \frac{V'_{oc} \times 3600}{F \times \tau_n}, \quad (15)$$

где V_n – общее количество фильтрата, собранное за время опыта, м³;

$V'_{oc} = F \times h$ – объем осадка, образовавшегося за время опыта, м³;

h – высота слоя осадка, м;

F – площадь фильтра, м²;

τ_n – продолжительность опыта, с.

6. По полученным результатам сделайте выводы.

Вопросы для контроля самостоятельной работы

1. Какой процесс называется фильтрованием? Приведите примеры применения этого процесса в пищевой промышленности.
2. Какие системы называются неоднородными? Приведите примеры неоднородных систем.
3. Чем руководствуются при выборе конструкции фильтра?
4. Чем обусловлен выбор фильтровальной перегородки?
5. Как разделяются процессы фильтрования по механизму фильтрования?
6. Что такое производительность фильтрования и скорость фильтрования? Какие факторы влияют на них?
7. Основное уравнение фильтрования. Дифференциальное уравнение фильтрования и его решение. Движущая сила процесса.
8. Понятия стационарного и нестационарного фильтрования.
9. Какие существуют способы создания движущей силы фильтрования?
10. Из чего складывается сопротивление процессу фильтрования?
11. Физический смысл констант фильтрования, их размерность.
12. Какими методами определяют константы фильтрования?
13. Что такое производительность фильтра по осадку? По фильтрату?
14. На что расходуется энергия при фильтровании?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКИХ СРЕД

Цели работы

1. Опытное изучение затрат мощности на перемешивание жидкости.
2. Нахождение критериального уравнения, описывающего процесс механического перемешивания жидкости.

1. Основы теории и постановка задачи исследования

Перемешивание жидких сред – это процесс многократного перемещения частиц неоднородной текучей среды друг относительно друга во всем объеме аппарата, осуществляемый за счет импульса, передаваемого среде механической мешалкой. В пищевой и мясомолочной отраслях промышленности, а также в сфере общественного питания перемешивание широко применяют для интенсификации процессов тепло- и массоотдачи, а также для получения однородных текучих смесей (растворов, эмульсий, суспензий).

Наиболее часто перемешивание осуществляют во вращающихся механических мешалках различных типов. Механические перемешивающие устройства состоят из трех основных частей: собственно мешалки, вала и привода. Мешалка является рабочим органом, закрепляемым на валу. Привод может быть осуществлён либо непосредственно от электродвигателя, либо через редуктор и клиноременную передачу. По устройству лопастей различают мешалки лопастные, рамные, якорные, пропеллерные, турбинные и специальные. По производственному признаку все мешалки делят на две группы:

1) быстроходные (пропеллерные, турбинные и др.), частота вращения которых составляет от 2 до 50 с^{-1} , а отношение $\frac{D}{d} > 3$;

2) тихоходные (якорные, рамные и лопастные), частота вращения которых составляет от $0,5$ до $1,5 \text{ с}^{-1}$, а $\frac{D}{d} > 2$.

Здесь D – диаметр сосуда мешалки, d – диаметр окружности, образованной лопастями мешалки при их вращении.

При перемешивании механическими мешалками возникает сложное трёхмерное течение жидкости. Первичным в этом течении является тангенциальное движение жидкости, которое вызывает радиальные и аксиальные потоки в пространстве, ограниченном дном аппарата, стенками аппарата и свободной поверхностью жидкости.

Поскольку аналитического описания поля скоростей в аппаратах с мешалками до настоящего времени получить не удалось из-за не преодолимых математических трудностей при попытках совместного решения уравнений Навье – Стокса и уравнения неразрывности потока, то работу мешалки характеризуют технологической интенсивностью I и эффективностью $\mathcal{E}$.

Интенсивностью перемешивания I называют возможность достижения некоторого строго определенного технологического результата (качества перемешивания) за определенное время τ .

$$I = \frac{V}{n \times \tau}, \quad (1)$$

где V – объем перемешиваемой жидкости, м^3 ;

n – частота вращения мешалки, с^{-1} ;

τ – время процесса, с.

При одинаковой частоте вращения действие мешалки будет тем более интенсивным, чем меньше время перемешивания.

Эффективностью $\mathcal{E}$ мешалок называют возможность достижения заданного технологического результата (качества перемешивания) при затрате определённой работы $N \times \tau$.

$$\mathcal{E} = \frac{V}{N \times \tau}, \quad (2)$$

где N – мощность, потребляемая мешалкой, Вт.

Очевидно, что действие мешалки тем более эффективно, чем меньше работы затрачивается на достижение требуемого технологического результата.

Мощность, потребляемая механическими мешалками, зависит от ряда факторов. Опытные исследования показывают, что она определяется вязкостью жидкости μ , плотностью жидкости ρ , частотой вращения мешалки n , диаметром окружности концов лопастей мешалки d , диаметром сосуда мешалки D :

$$N = f(\mu, \rho, n, d, D). \quad (3)$$

Для того чтобы зависимость (3) сделать расчетным уравнением, ее представляют в безразмерном виде следующим образом.

Мощность, потребляемая мешалкой, равна:

$$N = Q \times \Delta P, \quad (4)$$

где Q – расход жидкости, создаваемый мешалкой, м³/с;

ΔP – давление, создаваемое лопастями мешалки, Па.

Расход Q можно оценить, считая, что жидкость протекает через боковую поверхность S цилиндра диаметром d и высотой, равной ширине лопасти мешалки b , со скоростью, пропорциональной окружной скорости w концов лопастей. Тогда по закону сплошности потока

$$Q = W \times S = (\pi \times d \times n) \times (\pi \times d \times b). \quad (5)$$

Принимая определяющим размером величину d и отбрасывая постоянные π , получаем:

$$Q \approx n \times d^3. \quad (6)$$

Давление ΔP , создаваемое мешалкой, пропорционально динамическому давлению $(\rho \times w^2)/2$:

$$\Delta P \approx \frac{\rho \times w^2}{2} \approx \frac{\rho(\pi \times d \times n)^2}{2} \approx \rho \times n^2 \times d^2. \quad (7)$$

После подстановки формул (6) и (7) в выражение (4) имеем:

$$N = \rho \times n^3 \times d^5. \quad (8)$$

Отсюда получается безразмерный критерий мощности:

$$K_N = \frac{N}{\rho \times n^3 \times d^5}. \quad (9)$$

Критерий K_N является определяемым, так как содержит искомую величину мощности N . Критерий мощности K_N часто называют также модифицированным критерием Эйлера для перемешивания и обозначают Eu_m .

Критерий мощности K_N характеризует отношение разности давлений (со стороны нагнетания и опорожнения лопасти) к инерционным силам в потоке перемешиваемой жидкости.

Величины, стоящие в правой части формулы (3), объединяют в определяющие критерии Рейнольдса и Фруда. Известно, что обычно они записываются в виде:

$$Re = \frac{w \times l \times \rho}{\mu}, \quad (10)$$

$$Fr = \frac{w^2}{g \times l}. \quad (11)$$

Заменяя характерный размер l диаметром d и выражая скорость w через частоту вращения мешалки $w = \pi \times d \times n$ получаем критерии (10) и (11) применительно к процессу перемешивания:

$$Re_m = \frac{n \times d^2 \times \rho}{\mu} = \frac{n \times d^2}{\nu}, \quad (12)$$

$$Fr_m = \frac{n^2 \times d}{g}. \quad (13)$$

Модифицированный критерий Рейнольдса Re_m характеризует отношение сил инерции к силам вязкости в потоке жидкости.

Модифицированный критерий Фруда Fr_m характеризует отношение сил инерции и тяжести в потоке жидкости.

Таким образом, при условии геометрического подобия, критериальное уравнение для определения мощности на валу мешалки будет иметь следующий неявный вид:

$$K_N = C \times Re_m^m \times Fr_m^n. \quad (14)$$

В тех случаях, когда на поверхности однородной жидкости не образуется воронка (например, при установке отражательных перегородок), влияние силы тяжести будет пренебрежимо малым и уравнение (14) можно упростить:

$$K_N = C \times Re_m^m. \quad (15)$$

Значение коэффициента C и показателя степени m зависят от типа мешалки, конструкции аппарата и режима перемешивания. В данной работе предлагается после проведения опытов определить постоянные C и m уравнения (15).

2. Описание установки

Схема лабораторной установки приведена на рис. 1.

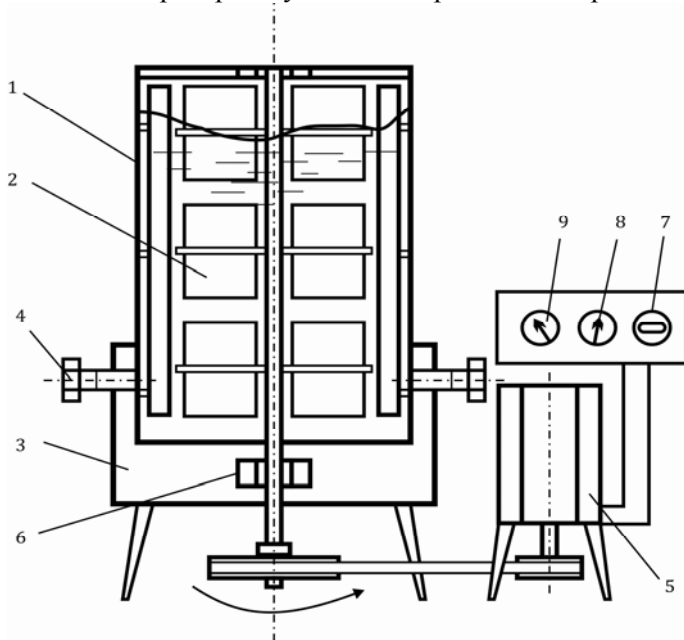


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

- 1 – сосуд; 2 – лопасти; 3 – станина; 4 – стопорные винты
5 – электродвигатель; 6 – муфта; 7 – автотрансформатор;
8 – тахометр; 9 – ваттметр

Ее основным элементом является мешалка, состоящая из сосуда 1 и вала с лопастями 2. Мешалка устанавливается на станине 3 и крепится к ней стопорными винтами 4. Привод мешалки осуществляется при помощи электродвигателя переменного тока 5; при этом необходимое сцепление валов электродвигателя и

мешалки достигается в муфте 6. Для изменения частоты вращения мешалки предусмотрен автотрансформатор 7. Тахометр 8 и ваттметр 9 служат соответственно для измерения частоты вращения мешалки и мощности, расходуемой на перемешивание.

3. Методика проведения работы

1. На вал электродвигателя устанавливают сосуд с мешалкой, наполненный жидкостью, и закрепляют его стопорными винтами.

2. Плавно регулируя ток в обмотке электродвигателя, приводят мешалку во вращательное движение и по указанию преподавателя, устанавливают 6-7 различных значений частоты вращения n ; для каждой из этих величин n определяют потребляемую мощность N_p .

3. Останавливают мешалку и выливают из сосуда жидкость. После этого мешалку снова приводят во вращательное движение и измеряют значения мощности холостого хода N_x на тех же самых частотах вращения, что и под нагрузкой (при залитом жидкостью сосуде).

Полученные значения мощностей на каждой частоте вращения необходимо занести в табл. 1.

Таблица 1

Опытные и расчетные величины

№	n , 1/с	N_x , Вт	N_p , Вт	N , Вт	Re_M	K_N	$lg Re_M$	$lg K_N$
1								
2								
3								
4								
5								
6								

4. Обработка опытных данных

1. Для каждого замера определяют мощность, потребляемую на перемешивание, по формуле $N = N_p - N_x$.

2. По формулам (12) и (9) рассчитывают критерии Re_M и K_N , а также их логарифмы $lgRe_M$ и lgK_N . Необходимые значения плотности и вязкости жидкости, а также некоторые постоянные величины берутся из табл. 2. Расчётные данные заносятся в табл. 1.

3. Определение констант C и m производят графически: по данным табл. 1 строят график зависимости $lgK_N = f(lgRe_M)$. Для этого на лист бумаги наносят экспериментальные точки с координатами $lgRe_M$ и lgK_N .

Таблица 2

Постоянные величины

Перемешиваемая жидкость	Температура $t, ^\circ\text{C}$	Плотность воды $\rho, \text{кг/м}^3$	Вязкость воды $\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$	Диаметр сосуда $D, \text{м}$	Диаметр мешалки $d, \text{м}$
Вода	10	1000	0,00131	0,16	0,14
	20	998,2	0,001004		
	30	996	0,000804		
	40	992	0,000657		

4. Через полученное поле точек проводят усредненную прямую линию. По данному графику находят константу m , равную $m = tg\alpha$ (где α – угол, образованный построенной линией и осью абсцисс).

5. Затем для каждой пары значений Re_M и K_N находят константу C_i по формуле:

$$C_i = \frac{K_{Ni}}{Re_{Mi}^m}. \quad (16)$$

6. Далее определяют среднее арифметическое значение константы $C = \sum C_i / n$ (n – число опытов).

7. Численные значения найденных констант C и m необходимо подставить в формулу (15), после чего критериальное уравнение процесса перемешивания жидких сред примет явный вид, например:

$$K_N = 15236,95 \times Re_M^{-1,2}. \quad (17)$$

8. По полученным результатам сделайте выводы.

ВНИМАНИЕ: При проведении экспериментов нельзя допускать работу мешалки с разбрызгиванием жидкости. Категорически запрещается трогать руками вращающиеся детали и низко наклоняться над ними во избежание захвата пальцев, волос и одежды. По окончании работы необходимо ослабить стопорные винты, снять сосуд, вылить из него рабочую жидкость и тщательно промыть его.

Вопросы для контроля самостоятельной работы

1. Цели лабораторного исследования.
2. Промышленное значение процесса перемешивания.
3. Каковы особенности движения жидкости в механических мешалках?
4. Что такое эффективность и интенсивность перемешивания?
5. Классификация и конструкции механических мешалок.
6. Как получить явный вид критериального уравнения подобия, описывающего процесс перемешивания?
7. Формулы и физические смыслы центробежных критериев Рейнольдса и Фруда.
8. Формула и физический смысл критерия мощности.
9. Какими измерительными приборами оснащена лабораторная установка?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

Цели работы

1. Закрепление знания теории переноса тепла в процессе конвективного теплообмена.
2. Изучение процесса теплообмена в теплообменнике типа «труба в трубе».
3. Определение коэффициента теплопередачи по данным испытания.

1. Основы теории и постановка задачи исследования

Теплообменом называется процесс переноса тепла, происходящий между телами, имеющими различную температуру. Его движущей силой является разность температур между более и менее нагретыми телами. Тела, участвующие в теплообмене, называются теплоносителями. Более нагретый теплоноситель называется *греющим агентом*, а менее нагретый теплоноситель – *охлаждающим агентом*. **Теплоотдача** – это перенос тепла от стенки к газообразной (или жидкой) среде или в обратном направлении. **Теплопередача** – это процесс передачи тепла от более нагретой к менее нагретой жидкости (или газу) через разделяющую их поверхность или твердую стенку.

Различают три способа распространения тепла: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

Теплопроводность представляет собой перенос тепла от более к менее нагретым участкам тела вследствие теплового движения и взаимодействия микрочастиц, непосредственно соприкасающихся друг с другом. В твердых телах теплопроводность обычно является основным видом распространения тепла.

Конвекцией называют перенос тепла вследствие движения и перемешивания макроскопических объемов газа или жид-

кости. Перенос тепла возможен в условиях свободной конвекции, обусловленной разностью плотностей в различных точках объема жидкости, возникающей вследствие неодинаковых температур в них, или в условиях вынужденной конвекции, когда происходит принудительное движение всего объема жидкости, например, при перемешивании ее мешалкой.

Тепловое излучение – процесс распространения электромагнитных колебаний с различной длиной волн, обусловленный тепловым движением атомов и молекул излучающего тела. Все тела способны излучать энергию, которая поглощается другими телами и снова превращается в тепло.

Тепловые балансы. На предприятиях пищевой, мясомолочной промышленности и сфере общественного питания широко распространены процессы тепловой обработки продуктов. Перенос тепла от одного теплоносителя к другому теплоносителю осуществляется в теплообменных аппаратах, называемых теплообменниками. При этом тепло, отдаваемое греющим агентом (Q_1), затрачивается на нагрев охлаждающего агента (Q_2), и некоторая относительно небольшая часть тепла расходуется на компенсацию потерь тепла аппаратом в окружающую сферу (Q_n). Тогда уравнение теплового баланса для теплообменника можно записать:

$$Q_1 = Q_2 + Q_n, \quad (1)$$

Для теплообменников, покрытых слоем тепловой изоляции, величина Q_n не превышает 3 – 5 % полезно используемого тепла, поэтому с практически приемлемой точностью можно принять:

$$Q_1 = Q_2. \quad (2)$$

Если теплообмен между жидкостями или газами осуществляется без изменения их агрегатного состояния в непрерывно действующих (поточных) теплообменных аппаратах, то уравнение теплового баланса (2) имеет вид:

$$Q = G_1 \times c_1 \times (t_{1н} - t_{1к}) = G_2 \times c_2 \times (t_{2к} - t_{2н}), \quad (3)$$

где Q – тепловой поток от греющего агента к охлаждающему агенту, Вт;

G_1 – расход греющего агента, кг/с;
 c_1 – удельная теплоемкость греющего агента, Дж/(кг×К);
 $t_{1н}$ и $t_{1к}$ – начальная и конечная температуры греющего агента, °С;
 G_2 – расход охлаждающего агента, кг/с;
 c_2 – удельная теплоёмкость охлаждающего агента, Дж/(кг×К);
 $t_{2н}$ и $t_{2к}$ – начальная и конечная температуры охлаждающего агента, °С.

При изменении агрегатного состояния теплоносителя (конденсация пара, испарение жидкости и т.д.) уравнение теплового баланса (2) принимает вид:

$$Q = D \times (i_n - i_{\text{конд}}) = G_2 \times c_2 \times (t_{2к} - t_{2н}), \quad (4)$$

где D – расход пара, кг/с;

i_n – энтальпия пара, Дж/кг;

$i_{\text{конд}}$ – удельная теплоемкость конденсата, Дж/(кг×К).

В зависимости от способа передачи тепла различают три основные группы теплообменников:

1) поверхностные теплообменники, в которых перенос тепла между теплоносителями происходит через разделяющую их поверхность (стенку);

2) теплообменники смешения, в которых тепло передается от одного теплоносителя к другому теплоносителю при их непосредственном соприкосновении;

3) регенеративные теплообменники, работающие в не стационарном режиме, в которых нагрев жидких или газообразных теплоносителей происходит за счет их соприкосновения с ранее нагретыми твердыми телами – насадкой, заполняющей аппараты и периодически нагреваемой другим (горячим) теплоносителем. Для осуществления теплообменных процессов пищевой технологии наиболее пригодны поверхностные теплообменники.

Основное уравнение теплопередачи. Расчет и анализ работы поверхностных теплообменников, работающих в стационарном режиме, выполняют, пользуясь основным уравнением теплопередачи:

$$Q = K \times F \times \Delta t_{cp}, \quad (5)$$

где Q – тепловой поток от греющего агента к охлаждающему, проходящий в единицу времени через произвольную поверхность, Вт;

K – коэффициент теплопередачи, определяющий среднюю скорость передачи тепла вдоль всей поверхности теплообмена;

Δt_{cp} – средняя разность температур между теплоносителями, определяющая среднюю движущую силу процесса теплопередачи или температурный напор, град.

Из уравнения (5) можно определить размерность и физический смысл коэффициента теплопередачи K :

$$K = \frac{Q}{F \times \Delta t_{cp}}, \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{град}} \right] \quad (6)$$

Коэффициент теплопередачи показывает, какое количество тепла (в Дж) переходит за 1 с от горячего теплоносителя к холодному через поверхность теплообмена 1 м² при средней разности температур между ними, равной 1 град (кельвин).

Для нахождения среднего температурного напора составляют графики изменения температур теплоносителей. На рис. 1 показан общий вид данных графиков для прямоточного и противоточного движения теплоносителей без изменения их агрегатного состояния, а также общий вид температурного графика при обогреве конденсирующимся паром. Средний температурный напор определяется по следующему логарифмическому уравнению:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_m}{2,3 \times \log \frac{\Delta t_{\bar{o}}}{\Delta t_m}}, \quad (7)$$

где $\Delta t_{\bar{o}}$ – движущая сила процесса теплопередачи на том конце аппарата, где она больше (то есть большая разность температур теплоносителей);

Δt_m – движущая сила процесса теплопередачи на том конце аппарата, где она меньше (то есть меньшая разность температур теплоносителей).

Например, для прямоточного движения теплоносителей $\Delta t_{\bar{o}}$ и Δt_m будут равны: $\Delta t_{\bar{o}} = t_{1H} - t_{2H}$; $\Delta t_m = t_{1K} - t_{2K}$. Для про-

тивотока: $\Delta t_{\bar{o}} = t_{1K} - t_{2H}$; $\Delta t_M = t_{1H} - t_{2K}$.

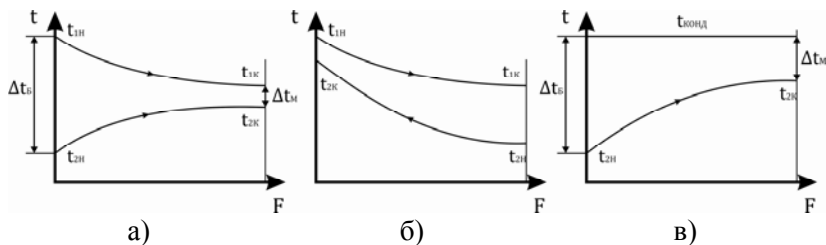


Рис. 1. Графики изменения температур теплоносителей:
а и б – проток и противоток без изменения агрегатного состояния;
в – при обогреве конденсирующимся паром

Если $\Delta t_{\bar{o}} / \Delta t_M \leq 2$, то с достаточной точностью (ошибка менее 5 %) вместо логарифмической разности температур (формула (7)) можно применять среднеарифметическую разность температур:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{o}} + \Delta t_M}{2}. \quad (8)$$

При расчете коэффициента теплопередачи K полагают, что процесс теплопередачи состоит из трех элементарных этапов, протекающих последовательно друг за другом:

- 1) процесс теплоотдачи от греющего агента к стенке аппарата, разделяющей теплоносители;
- 2) перенос тепла теплопроводностью через стенку аппарата;
- 3) процесс теплопередачи от стенки аппарата к охлаждающему агенту.

По этой причине коэффициент теплопередачи является аддитивной величиной, определяемой интенсивностями каждого из указанных элементарных актов:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (9)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от греющего агента к стенке аппарата, Вт/(м²×К);

δ – толщина стенки, м;

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м×К);

α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата к охлаждающему агенту, Вт/(м²×К).

Коэффициент теплоотдачи α показывает, какое количество тепла передается от 1 м² поверхности стенки к жидкости в течение 1 с при разности температур между стенкой и жидкостью 1 град.

Коэффициент теплопроводности λ показывает, какое количество тепла переносится путем теплопроводности в единицу времени через единицу поверхности теплообмена при падении температуры на 1 градус на единицу длины нормали к изометрической поверхности.

Термическое сопротивление. Анализируя зависимость (9), необходимо отметить, что величина $1/\alpha_1 = r_1$ называется термическим сопротивлением при переходе тепла от греющего агента к стенке аппарата. Соотношение $\delta/\lambda = r_{ст}$ является термическим сопротивлением самой стенки аппарата. Величина $1/\alpha_2 = r_2$ называется термическим сопротивлением при переходе тепла от стенки аппарата к охлаждающему агенту. Очевидно, что общее термическое сопротивление при теплопередаче составляет:

$$R = r_1 + r_{ст} + r_2, \frac{м^2 \times К}{Вт}, \quad (10)$$

и оно обратно пропорционально коэффициенту теплопередачи: $K = 1 / R$ или $R = 1 / K$.

Если теплообменная поверхность является многослойной и имеет загрязнения, то ее термическое сопротивление складывается из термических сопротивлений всех слоев и термического сопротивления загрязнений:

$$r_{ст} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum r_{загр}, \quad (11)$$

где n – число слоев стенки;

$\sum r_{загр}$ – суммарное техническое сопротивление загрязнений.

Тогда общее термическое сопротивление будет равно:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum r_{\text{загр}} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (12)$$

Коэффициент теплоотдачи. Необходимо принять во внимание, что вследствие сложной структуры потоков теплоносителей вблизи стенки аппарата (особенно при турбулентном движении) коэффициент теплоотдачи является сложной функцией многих переменных. Коэффициент теплоотдачи зависит от следующих факторов:

- 1) переменные, определяющие режим движения теплоносителя – скорость теплоносителя w , его плотность ρ и вязкость μ ;
- 2) тепловые свойства жидкости – удельная теплоемкость c , теплопроводность λ и коэффициент объёмного расширения β ;
- 3) геометрические параметры – эквивалентный диаметр d_s , канала, длина канала l , шероховатость теплообменной поверхности Δ .

Таким образом, $\alpha = f(w, \rho, \mu, c, \lambda, \beta, d_s, l, \Delta)$.

Вследствие сложной зависимости коэффициента теплоотдачи α от большого числа факторов невозможно получить единое расчетное уравнение, пригодное для всех случаев теплоотдачи. Однако для типовых случаев теплоотдачи путем обобщения опытных данных на основе теории подобия получены критериальные уравнения, позволяющие рассчитывать коэффициенты теплоотдачи.

Критериальные уравнения. При развитии турбулентном течении в прямых трубах ($Re > 10\,000$), без изменения агрегатного состояния теплоносителя критериальное уравнение имеет вид:

$$Nu = 0,021 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,43} \times \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}}\right)^{0,25} \times \varepsilon_l, \quad (13)$$

где $Nu = \frac{\alpha \times d_s}{\lambda}$ – критерий Нуссельта, который характеризует интенсивность перехода тепла на границе между стенкой и потоком жидкости. Он является мерой соотношения тол-

щины пограничного слоя $\delta_{\text{тепл}}$ и определяющего геометрического размера;

$$Re = \frac{W \times d_3 \times \rho}{\mu} = \frac{W \times d_3}{\nu} - \text{критерий Рейнольдса, показывающий}$$

режим движения жидкости и являющийся мерой соотношения сил инерции и трения (вязкости) в потоке жидкости;

$$Pr = \frac{\mu \times c}{\lambda} = \frac{\nu}{\alpha} - \text{критерий Прандтля, характеризующий подобие физических свойств теплоносителей при конвективном теплообмене и являющийся мерой подобия полей температур и скоростей в потоке жидкости;}$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \times \rho} - \text{коэффициент температуропроводности теплоносителя, м}^2/\text{с;}$$

Pr_{cm} – критерий Прандтля теплоносителя при средней температуре поверхности стенки со стороны данного теплоносителя;

ε_l – пограничный коэффициент, учитывающий влияние на коэффициент теплоотдачи отношения длины трубы l к ее диаметру d ($\varepsilon_l = 0,95$).

Для расчета теплоотдачи в переходной области ($2300 < Re < 10\,000$) можно воспользоваться приближенным уравнением:

$$Nu = 0,008 \times Re^{0,9} \times Pr^{0,43}. \quad (14)$$

Теплоотдача при ламинарном течении в прямых трубах и каналах ($Re < 2300$) рассчитывается по следующему критериальному уравнению:

$$Nu = 0,17 \times Re^{0,33} \times Pr^{0,43} \times Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (15)$$

где $Gr = \frac{g \times d_3^3 \times \beta \times \Delta t}{\nu^2}$ – критерий Грасгофа, который вводится в уравнение при теплообмене в условиях естественной конвекции и показывает меру отношения сил трения (вязкости) к подъемной силе, определяемой разностью плотностей в различных точках потока;

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

β – коэффициент объемного расширения, $1/\text{град}$;

Δt – разность температур жидкости и стенки (или наоборот), град.

Коэффициент объемного расширения (при выполнении данной лабораторной работы) подбирается по средней температуре теплоносителя из табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты объёмного расширения воды, 1/град

t, °C	$\beta \times 10^5$	t, °C	$\beta \times 10^5$	t, °C	$\beta \times 10^5$
5	1,5	50	46	100	75
10	9	60	52	120	85
20	21	70	58	140	97
30	30	80	54	160	110
40	39	90	70		

Во всех вышеприведенных уравнениях значения теплофизических свойств теплоносителя отнесены к его средней температуре. Она находится следующим образом. Для того теплоносителя, у которого температура изменяется в теплообменнике на меньшее число градусов, средняя температура определяется как средняя арифметическая между начальной и конечной:

$$t_{\text{ср1}} = \frac{t_{1\text{н}} + t_{1\text{к}}}{2}. \quad (16)$$

Для второго теплоносителя среднюю температуру находят по формуле:

$$t_{\text{ср2}} = t_{\text{ср1}} \pm \Delta t_{\text{ср}}. \quad (17)$$

Формула (17) справедлива и в том случае, когда температура первого теплоносителя постоянна вдоль поверхности теплообмена.

Коэффициент теплоотдачи при конденсации. При пленочной конденсации насыщенного пара на плоской или цилиндрической вертикальной поверхности коэффициент теплоотдачи рассчитывается по уточненной формуле Нуссельта:

$$\alpha = 1,15 \times \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \times \rho^2 \times r \times g}{\mu \times \Delta t \times h}}, \quad (18)$$

где $\Delta t = t_{\text{конд}} - t_{\text{ст}}$ является разностью температур конденсата и стенки;

λ, ρ, r, μ – теплофизические свойства конденсата, взятые при температуре $\Delta t = (t_{\text{конд}} - t_{\text{ст}})/2$;

h – высота трубы, м.

Для расчета коэффициента теплоотдачи при пленочной конденсации насыщенного пара на наружной поверхности горизонтальной трубы применяется формула:

$$\alpha = 0,72 \times \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \times \rho^2 \times r \times g}{\mu \times \Delta t \times d}}, \quad (19)$$

где d – диаметр трубы, м.

В данной работе предлагается провести испытание работы теплообменника типа «труба в трубе», определить коэффициенты теплоотдачи для греющего и охлаждающего агентов и рассчитать коэффициент теплопередачи.

2. Описание установки

Схема лабораторной установки показана на рис. 2.

Основным элементом установки является теплообменник «труба в трубе» 1, состоящий из трех горизонтальных элементов, расположенных друг над другом и покрытых теплоизоляцией. Стальные трубы теплообменника имеют диаметр: наружные 25 x 2 мм, внутренние – 12 x 1,5 мм (первое число означает внешний диаметр трубы, второе – толщину стенки).

Рабочая длина каждого элемента составляет 0,75 м. Горячая вода проходит по межтрубному пространству, а холодная вода движется по внутренним трубам снизу вверх. Расход горячей воды регулируется вентилем 2 и измеряется при помощи ротаметра 4 и его тарировочного графика, находящегося на щите установки. Вентили 5, 6, 7 и 8 позволяют подавать горячую воду либо снизу вверх через межтрубное пространство, обеспечивая прямоток теплоносителей, либо сверху вниз, обеспечивая противоток теплоносителей. В первом случае (при прямотоке) открыты вентили 5 и 8. Во втором (при противотоке) – 6 и 7.

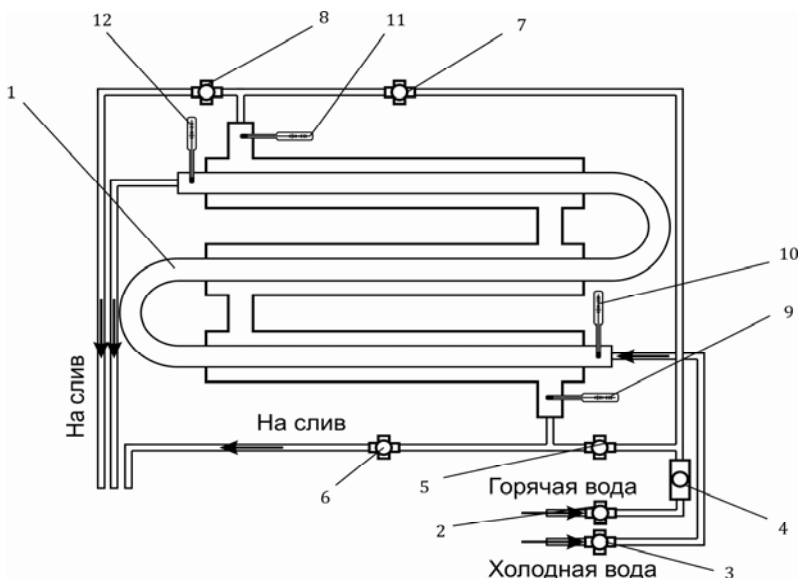


Рис. 2. Схема лабораторной установки:
 1 – теплообменник «труба в трубе»; 2, 3, 5, 6, 7, 8 – вентили;
 4 – ротаметр; 9, 10, 11, 12 – термометры

Термометры 9, 10, 11, 12 позволяют измерить температуры теплоносителей при входе и выходе теплоносителей из теплообменника.

После выхода теплоносителей из теплообменника они направляются на слив в канализацию.

3. Методика проведения работы

1. Перед началом каждого опыта все вентили должны быть закрыты. Плавно открывают вентиль 3, после чего холодная вода начинает поступать в теплообменник.

2. По заданию преподавателя выставляют определенный расход горячей воды (при прямотоке открывают вентили 8, 5 и 2; при противотоке открывают вентили 6, 7 и 2).

3. Через 5-7 минут после установления постоянных расходов горячей и холодной воды теплообменник выйдет на ста-

ционный режим работы, о чем судят по постоянству во времени температур теплоносителей на входе и выходе из теплообменника. После этого следует снять показания всех контрольных приборов и занести их в табл. 1.

Таблица 1

Опытные данные

Схема движения теплоносителей	Начальная температура горячей воды $t_{1н}, ^\circ\text{C}$	Конечная температура горячей воды $t_{1к}, ^\circ\text{C}$	Расход горячей воды $G_1, \text{кг/с}$	Начальная температура холодной воды $t_{2н}, ^\circ\text{C}$	Конечная температура холодной воды $t_{2к}, ^\circ\text{C}$
Прямоток					
Противоток					

4. Обработка опытных данных

1. Определяют среднюю температуру горячей и холодной воды $t_{1ср}$ и $t_{2ср}$ по которым находят теплофизические характеристики теплоносителей из табл. 2.

Таблица 2

Физические свойства воды

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж/(кг}\times\text{K)}$	$\lambda\times 10^2, \text{Вт/(м}\times\text{K)}$	$\mu\times 10^6, \text{Па}\times\text{с}$	$\nu\times 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	999,6	4,2121	55,1	1788	1,789	13,67
10	999,7	4,1911	57,5	1306	1,306	9,52
20	998,2	4,1828	59,9	1004	1,006	7,02
30	995,7	4,174	61,8	801,5	0,805	5,42
40	992,2	4,174	63,4	653,3	0,659	4,31
50	988,1	4,174	64,8	549,4	0,556	3,54
60	983,2	4,179	65,9	469,9	0,478	2,98
70	977,8	4,187	66,8	406,1	0,415	2,55
80	971,8	4,195	67,5	355,1	0,365	2,21
90	965,3	4,208	68,0	314,9	0,326	1,5
100	958,4	4,220	68,3	282,5	0,285	1,75
110	951,0	4,233	68,5	259,0	0,272	1,60

2. Строят температурный график изменения температур теплоносителей и рассчитывают средний температурный напор $\Delta t_{\text{ср}}$ по формулам (7) или (8).

3. Пренебрегая тепловыми потерями, определяют расход холодной воды на основании формулы (3):

$$G_2 = \frac{G_1 \times c_1 \times (t_{1\text{н}} - t_{1\text{к}})}{c_2 \times (t_{2\text{к}} - t_{2\text{н}})}, \text{ кг/с.} \quad (20)$$

4. Воспользовавшись законом неразрывности потока $G = \rho \times W \times S$, определяют среднюю скорость горячей воды:

$$W_1 = \frac{G_1}{\rho_1 \times S_1}, \text{ м/с} \quad (21)$$

где $S_1 = \frac{\pi}{4} (D_{\text{вн}}^2 - d_{\text{н}}^2) = (D_{\text{вн}}^2 - d_{\text{н}}^2)$ – площадь межтрубного пространства, м^2 ;

$D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр большой трубы, м;

$d_{\text{н}}$ – наружный диаметр малой трубы, м.

Аналогичным образом находят среднюю скорость холодной воды:

$$W_2 = \frac{G_2 \times S_2}{\rho_2}, \quad (22)$$

где $S_2 = \frac{\pi}{4} \times d_{\text{вн}}^2 = 0,785 \times d_{\text{вн}}^2$ – внутренняя площадь малой трубы, м^2 .

5. Определяют критерий Рейнольдса для горячей и холодной воды:

$$Re_1 = \frac{W_1 \times d_{\text{э1}}}{v_1} = \frac{W_1 \times d_{\text{э1}} \times \rho_1}{\mu_1}, \text{ где } d_{\text{э1}} = D_{\text{вн}} - d_{\text{н}}. \quad (23)$$

$$Re_2 = \frac{W_2 \times d_{\text{э2}}}{v_2} = \frac{W_2 \times d_{\text{э2}} \times \rho_2}{\mu_2}, \text{ где } d_{\text{э2}} = d_{\text{вн}}. \quad (24)$$

6. Находят критерий Прандтля для греющего и охлаждающего агентов:

$$Pr_1 = \frac{\mu_1 \times c_1}{\lambda_1} = \frac{v_1}{\alpha_1}; \quad (25)$$

$$Pr_2 = \frac{\mu_2 \times c_2}{\lambda_2} = \frac{v_2}{\alpha_2}; \quad (26)$$

7. Выбирают критериальные уравнения, воспользовавшись формулами (13), (14) и (15), в зависимости от режима движения теплоносителей (критерия Рейнольдса). Находят по ним Nu_1 и Nu_2 (без учета поправки Pr/Pr_{cm} , так как пока неизвестна температура стенки внутренней трубы теплообменника).

8. Находят коэффициент теплоотдачи от горячей воды к наружной стенке малой трубы по формуле:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \times \lambda_1}{d_{\text{в}1}}. \quad (27)$$

Коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки малой трубы к холодной воде определяют следующей зависимостью:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \times \lambda_2}{d_{\text{в}2}}. \quad (28)$$

9. Зная коэффициенты теплоотдачи, находят коэффициент теплопередачи по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + r_1 + r_2 + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (29)$$

где δ_{cm} – толщина стенки малой трубы, м;

λ_{cm} – коэффициент теплопроводности материала стенки (для стали $\lambda_{cm} = 46,5$ Вт/(м×К));

r_1 и r_2 – термическое сопротивление загрязнений малой трубы со стороны горячей и холодной воды. Значения r_1 и r_2 выбирают из диапазона $1,2 \times 10^{-3} \div 1,6 \times 10^{-3}$.

10. Определяют плотность теплового потока:

$$q = K \times \Delta t_{cp}, \text{ Вт/м}^2. \quad (30)$$

11. Находят необходимую поверхность теплопередачи, м²:

$$F = \frac{Q}{K \times \Delta t_{cp}} = \frac{Q}{q}, \quad (31)$$

где Q – тепловая нагрузка аппарата, определяемая по уравнению теплового баланса (3), Вт.

12. Фактическая поверхность теплопередачи равна:

$$F_{\Phi} = 3\pi \times d_{\text{ср}} \times l, \quad (32)$$

где $d_{\text{ср}} = (d_{\text{вн}} + d_{\text{н}})/2$ при $\alpha_1 \cong \alpha_2$;

$d_{\text{ср}} = d_{\text{н}}$ при $\alpha_1 \ll \alpha_2$;

l – рабочая длина элемента теплообменника, $l = 0,75$ м.

13. Определяют расхождение необходимой и фактической поверхности теплопередачи:

$$\Delta F = \left| \frac{F_{\Phi} - F}{F_{\Phi}} \right| \times 100\%. \quad (33)$$

14. По результатам расчетов делают соответствующие выводы.

Вопросы для контроля самостоятельной работы

1. Для каких целей применяется тепловая обработка пищевых продуктов? Какие, в соответствии с этим, различают теплообменные аппараты?

2. Физический смысл коэффициента теплоотдачи.

3. От чего зависит коэффициент теплоотдачи?

4. Какие критерии подобия используются при расчете коэффициента теплоотдачи и что они характеризуют?

5. Какой физический смысл имеют критерии Re , Pr , Nu , Gr ?

6. Критериальные зависимости для определения коэффициента теплоотдачи при различных режимах движения (без изменения агрегатного состояния жидкости).

7. Основное уравнение теплопередачи.

8. Физический смысл коэффициента теплопередачи. От чего он зависит?

9. Изобразите график изменения температур теплоносителей в процессе теплообмена при прямотоке и противотоке (оба теплоносителя – жидкости).

10. То же, только один из теплоносителей – пар.

11. Что называется средним температурным напором и как он определяется?

12. В чем заключается проверочный и проектный расчет теплообменного аппарата?

13. Что понимается под тепловой нагрузкой аппарата?

14. Уравнение теплового баланса теплообменника при теплообмене без изменения агрегатного состояния.

15. Уравнение для определения в аппарате удельного теплового потока:

а) от горячего потока к стенке,

б) от поверхности нагрева к холодному потоку,

в) через поверхность нагрева,

г) от горячего потока к холодному через поверхность нагрева.

16. Как определяется температура стенки со стороны горячего и со стороны холодного теплоносителя?

17. Чем определяется выбор скорости теплоносителей в аппарате?

18. Как влияет скорость потока на величину коэффициента теплоотдачи в теплообменном аппарате?

19. Каковы пути интенсификации работы теплообменных аппаратов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ВЫПАРИВАНИЯ

Цели работы

1. На практике изучить закономерности процесса выпаривания.
2. На основании экспериментальных данных произвести расчет лабораторной выпарной установки.
3. Сравнить полученные результаты с действительными параметрами установки.

1. Основы теории и постановка задачи исследования

Выпариванием называется процесс удаления влаги из растворов нелетучих веществ путем ее испарения в окружающую среду при кипении раствора.

Процесс выпаривания широко применяется в технологиях производства многих пищевых продуктов и полуфабрикатов (сгущенное и сухое молоко, растворимые полуфабрикаты и концентраты и т.д.), а также в химической и других отраслях промышленности.

Известно, что для удаления 1 кг влаги необходимо примерно 2200 кДж энергии, поэтому выпаривание является весьма энергоемким процессом. Однако в современных технологиях удаляемую в виде пара влагу используют для обогрева другого оборудования, помещений и т.п. Как правило, выпарные аппараты обогреваются водяным паром, который называется первичным или греющим. Пар, образующийся при кипении раствора, называется вторичным.

Выпаривание может осуществляться под атмосферным, вакуумным и избыточным давлением. Наиболее простым способом является первый, когда кипение раствора происходит под атмосферным давлением и образующийся пар просто удаляется в атмосферу. Этот способ энергетически очень затратный и

практически не используется в промышленности. Другие два способа используются, как правило, совместно в так называемых многокорпусных выпарных установках, в которых греющим паром для каждого последующего корпуса является вторичный пар из предыдущего.

Удельная теплота парообразования тем выше, чем ниже давление, поэтому и расход энергии на выпаривание под вакуумом выше, чем при выпаривании при атмосферном или избыточном давлении. Однако термолабильность многих пищевых растворов ограничивает допустимую температуру кипения. Так, например, красящие вещества, содержащиеся в экстрактах из растительного сырья, разлагаются при нагревании до 50...60 °С. Разлагаются при нагревании аскорбиновая кислота и другие витамины, а также биологически активные компоненты, содержащиеся в растворах. Поэтому выпаривание под вакуумом широко используется в пищевой промышленности.

Материальный баланс процесса выпаривания в общем виде записывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} G_{\text{н}} - W &= G_{\text{к}}, \\ x_{\text{н}} \times G_{\text{н}} &= x_{\text{к}} \times G_{\text{к}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $G_{\text{н}}$, $G_{\text{к}}$ – масса исходного (начального) и упаренного (конечного) раствора соответственно, кг или кг/с;

W – масса жидкости удаляемой из раствора, кг или кг/с; $x_{\text{н}}$, $x_{\text{к}}$ – массовая концентрация исходного и упаренного раствора соответственно.

Затраты тепла на осуществления процесса выпаривания зависят от начальной температуры исходного раствора и от того, ведется ли процесс в одиночном аппарате или многокорпусной установке. Как правило, исходный раствор подается при температуре, близкой к температуре кипения, поэтому затраты тепла на подогрев исходного раствора бывают невелики. То, как проводить выпаривание – в одиночном аппарате или многокорпусной установке, – зависит от количества удаляемой влаги. Если концентрацию раствора необходимо повысить существенно, то целесообразнее применять многокорпусное выпаривание,

которое позволяет экономить энергию за счет использования теплоты вторичного пара и эффекта самоиспарения (при прямом соединении корпусов) во время перехода раствора из корпуса в корпус. При удалении небольшого количества влаги относительно массы раствора экономичнее вести процесс выпаривания в одиночном аппарате (простая выпарка). В общем случае тепловой баланс процесса выпаривания можно представить в виде:

$$Q = Q_{\text{наг}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{пот}} - Q_{\text{вт}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{наг}}$ – теплота нагрева, Вт или Дж;

$Q_{\text{исп}}$ – теплота испарения, Вт или Дж;

$Q_{\text{пот}}$ – тепловые потери, принимаемые, как правило, в размере 3...5 % от суммы первых двух слагаемых, Вт или Дж;

$Q_{\text{вт}}$ – компенсация тепла за счет использования энергии вторичного пара, Вт или Дж.

Для простой выпарки тепловой баланс будет иметь вид:

$$Q = G_{\text{н}} \times c \times (t_{\text{кип}} - t_{\text{н}}) + W \times r + Q_{\text{пот}}, \quad (3)$$

где c – теплоемкость исходного раствора, Дж/(кг·°C);

$t_{\text{кип}}$ – температура кипения раствора, °C;

$t_{\text{н}}$ – начальная температура раствора, °C;

r – удельная теплота испарения, Дж/кг.

Как в любом процессе теплообмена, интенсивность выпаривания зависит от скорости теплопередачи, т.е.

$$Q_{\text{пз}} = G_{\text{н}} \times c \times (t_{\text{кип}} - t_{\text{н}}) + W \times r = K \times F \times \Delta t_{\text{пз}}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{пз}}$ – полезные затраты тепла, Вт;

K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C);

F – площадь поверхности теплопередачи, м²;

$\Delta t_{\text{пз}}$ – полезная разность температур между греющим теплоносителем (как правило, водяным паром) и кипящим раствором.

Температура кипения раствора рассчитывается так:

$$t_{\text{кип}} = t_{\text{вт}} + \Delta t_{\text{фз}} + \Delta t_{\text{гс}} + \Delta t_{\text{г}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{вт}}$ – температура вторичного пара, которая определяется по его давлению, °C;

$\Delta t_{\text{фз}}$ – физико-химическая (температурная) депрессия, т.е. разность между температурой кипения раствора и чистого растворителя (зависит от концентрации раствора), °C;

$\Delta t_{\text{гс}}$ – средняя гидростатическая депрессия, зависящая от величины гидростатического давления столба кипящего раствора, °C;

$\Delta t_{\text{г}}$ – гидравлическая депрессия, зависящая от потерь давления в паропроводе, по которому вторичный пар удаляется из аппарата, °C.

Нередко гидростатическая и гидравлическая депрессии малы по сравнению с температурной и в этом случае ими пренебрегают.

Существуют два способа выпаривания: пленочное и пузырьковое. Наиболее распространенным из них является пузырьковое, пленочное же применяют для концентрирования термолабильных и вспенивающихся растворов.

Конструкции выпарных аппаратов весьма разнообразны, однако большинство из них являются, по сути, трубчатыми теплообменниками. Наибольшее распространение получили трубчатые выпарные аппараты с центральной циркуляционной трубой. Нередко используются аппараты с принудительной циркуляцией, с вынесенной греющей камерой. Для выпаривания вязких и термолабильных растворов чаще применяют роторно-пленочные выпарные аппараты.

2. Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки изображена на рис. 1.

Принцип работы установки следующий. Из напорной емкости 1 по подводящей трубке 3 в кипятельную камеру подается исходный раствор соли или сахара, расход которого можно регулировать вентилем 2. В кипяточной камере раствор нагревается и кипит за счет подвода тепловой энергии посредством электронагревателя 8. Водяной пар, образующийся при кипении

раствора, конденсируется на внутренней поверхности конденсаторного колпака 5, который оснащен рубашкой охлаждения 6. За процессом, происходящим в кипятильной камере, можно наблюдать через смотровое окно 4.

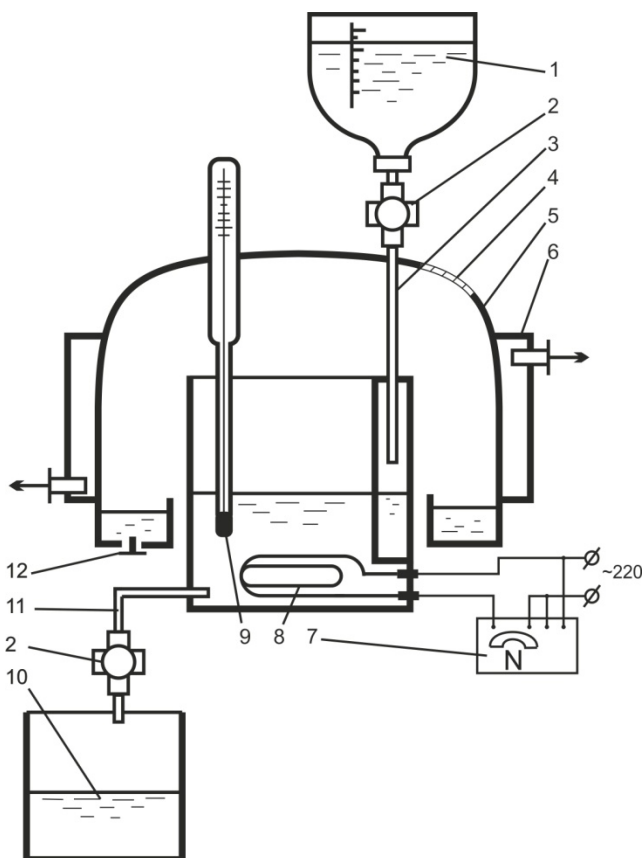


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

1 – напорная емкость; 2 – вентиль; 3 – подводящая трубка; 4 – смотровое окно; 5 – конденсаторный колпак; 6 – рубашка охлаждения; 7 – ватт-метр; 8 – нагревательный элемент; 9 – термометр; 10 – сборник концентрата; 11 – отводящая трубка; 12 – отверстие для слива конденсата

Сконцентрированный раствор, который образуется в результате испарения части влаги из исходного, выводится из кипятильной камеры через отводящую трубку 11 и скапливается в сборнике концентрата 10. Вентилем 2, имеющимся на отводящей трубке 11, можно регулировать расход концентрата.

Конденсат, скапливающийся на дне конденсаторного колпака, при необходимости можно удалять через сливное отверстие 12. Для измерения мощности, потребляемой нагревательным элементом, имеется ваттметр 7. Термометр 9 необходим для измерения температуры кипения.

3. Методика проведения лабораторной работы

1. Приготавливают 1,5–2 литра 4-6%-ного раствора соли или сахара.

2. Уточняют концентрацию раствора, измерив на рефрактометре его коэффициент преломления и воспользовавшись тарировочными графиками, представленными на рис. 2 и 3.

3. Проверяют отсутствие раствора и воды в кипятильной камере 1, сборнике конденсата 5, емкости 4 и сборнике концентрата 3, а также удостоверяются в том, что все вентили и сливные отверстия закрыты.

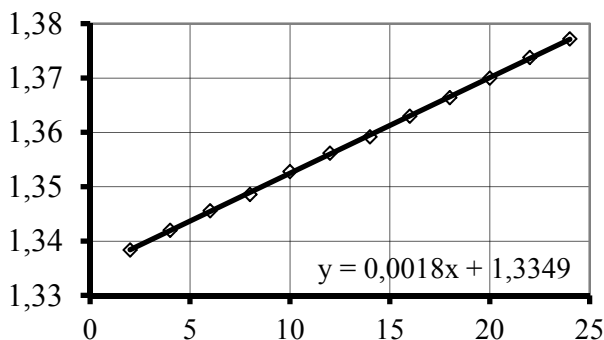


Рис. 2. Зависимость коэффициента преломления света для водного раствора поваренной соли от его концентрации

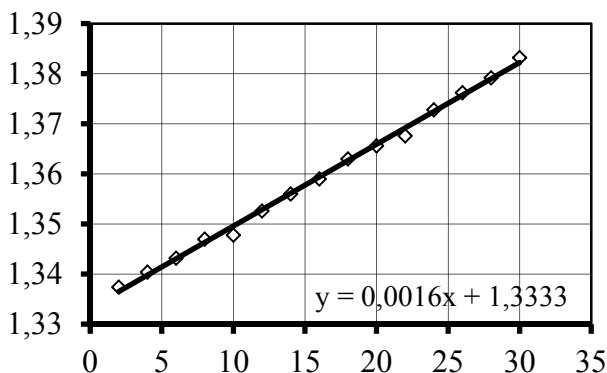


Рис. 3. Зависимость коэффициента преломления света для водного раствора сахара от его концентрации

4. Заливают раствор в емкость 1 чуть выше верхней границы рекомендуемого уровня и открывают вентиль на подводящей трубке.

5. Засекают время, за которое уровень раствора в емкости снизится от верхней рекомендуемой границы до нижней. Далее (на протяжении всей лабораторной работы) необходимо поддерживать примерно постоянный уровень в пределах рекомендуемых границ, подливая раствор в емкость 1.

6. Одновременно с наполнением кипятильной камеры определяют начальную температуру раствора $t_{нач2}$, °С.

7. В тот момент, когда уровень раствора будет выше нагревательного элемента, его следует подключить к источнику питания и определить с помощью ваттметра потребляемую мощность N (Вт).

8. В тепловую рубашку конденсатора подают охлаждающую воду.

10. В момент начала кипения раствора открывают кран на отводящей трубке и ежеминутно отбирают пробы упаренного раствора для определения его концентрации.

11. Когда процесс выпаривания выйдет на стационарный режим, т.е. концентрация упаренного раствора будет неизмен-

ной, отбирают порцию получаемого концентрата в течение 50 – 60 с в мерник, в качестве которого можно использовать небольшой сосуд известной массы M' (граммов).

12. Измеряют температуру кипящего раствора $t_{кин}$, °C, после чего отключают нагревательный элемент от источника питания.

13. Далее определяют массу мерника с порцией концентрата M'' (г).

14. Дожидаются полного опорожнения напорной емкости 1 и кипятильной камеры, а также сливают скопившийся конденсат, открыв отверстие 12.

В ходе лабораторной работы в отчете фиксируют результаты выполненных измерений:

x_n – концентрация исходного раствора, %;

x_k – концентрация упаренного раствора, %;

V_n – объем, заключенный между верхней и нижней границами рекомендуемого уровня в напорной емкости, м³;

τ_n – время по пункту 5 методики проведения работы, с;

τ_k – время по пункту 11 методики проведения работы), с;

t_n – температура исходного раствора, °C;

$t_{кин}^p$ – экспериментальная температура кипения раствора, °C;

M' , M'' – массы пустого и полного мерника (см соответственно пункты 11 и 13 методики проведения работы), г.

4. Обработка экспериментальных данных

1. По значениям концентрации исходного раствора x_n и его начальной температуры t_n определяют теплоемкость c (формулы (17) и (18)) и плотность ρ_n , кг/м³ исходного раствора (табл. 2 и 3).

2. По значениям средней концентрации раствора $x_{cp} = (x_k + x_n)/2$ и температуры кипения $t_{кин}$ определяют свойства кипящего раствора:

$\Delta t_{\phi x}$ – температурную депрессию, °C (табл. 1);

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м×°C) (формулы (19) и (20));

ν – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$ (используя данные табл. 2–5);

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м (формула (21));

$\rho_{\text{жс}}$ – плотность, кг/м^3 (табл. 2 и 3).

3. По величине атмосферного давления определяют:

$t_{\text{вт}}$ – температуру вторичного пара, $^{\circ}\text{С}$

r – удельную теплоту парообразования (испарения) вторичного пара, Дж/кг ;

4. Рассчитывают теоретическую температуру кипения раствора, пренебрегая гидростатической и гидравлической депрессиями:

$$t_{\text{кип}}^{\text{т}} = t_{\text{вт}} + \Delta t_{\text{фх}}. \quad (6)$$

Погрешность измерений будет равна:

$$\varepsilon = \left| \frac{t_{\text{кип}}^{\text{т}} - t_{\text{кип}}^{\text{э}}}{\Delta t_{\text{фх}}} \right| \times 100 \%. \quad (7)$$

5. Определяют расходы исходного и упаренного растворов:

$$G_{\text{Н}} = \frac{\rho_{\text{Н}} \times V_{\text{Н}}}{\tau_{\text{Н}}}, \text{ кг/с}, \quad (8)$$

$$G_{\text{К}} = \frac{M'' - M'}{\tau_{\text{К}}}, \text{ кг/с}. \quad (9)$$

6. Зная расход исходного и упаренного растворов, а также их концентрации, определяют количество выпариваемой воды и погрешность материального баланса по растворенному веществу:

$$W = G_{\text{Н}} - G_{\text{К}}, \text{ кг/с}, \quad (10)$$

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{G_{\text{Н}} \times x_{\text{Н}}}{G_{\text{К}} \times x_{\text{К}}} \right| \times 100 \%. \quad (11)$$

7. Рассчитывают полезные затраты тепла и тепловые потери:

$$Q_{\text{пз}} = G_{\text{Н}} \times c \times (t_{\text{кип}} - t_{\text{Н}}) + W \times r, \text{ Вт}, \quad (12)$$

$$Q_{\text{пот}} = N - Q_{\text{пз}}, \text{ Вт}. \quad (13)$$

8. Далее рассчитывают коэффициент теплоотдачи для кипящего раствора:

$$\alpha_{\text{кип}} = b \left(\frac{\lambda^2}{\nu \times \sigma \times T_{\text{кип}}} \right)^{\frac{1}{3}} \times q^{\frac{2}{3}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{°C}), \quad (14)$$

$$q = \frac{N}{S} = \frac{N}{\pi \times d \times L}, \text{ Вт}/\text{м}^2, \quad (15)$$

где b – безразмерный коэффициент, зависящий только от соотношения плотностей жидкости и пара (в нашем случае можно принять $b \approx 0,08$);

$T_{\text{кип}}$ – термодинамическая температура кипения, К;

q – плотность теплового потока, Вт/м²;

S – площадь поверхности теплопередачи, м²;

d – диаметр нагревательного элемента ($d = 0,008$ м);

L – длина нагревательного элемента ($L = 0,5$ м).

9. Рассчитывают разность температур Δt между поверхностью нагревательного элемента и кипящим раствором:

$$\Delta t = \frac{N}{F} \left(\frac{1}{\alpha} + r_{\text{нак}} \right), \quad (16)$$

где $r_{\text{нак}}$ – термическое сопротивление слоя накипи, имеющегося на нагревательном элементе ($r_{\text{нак}} \approx 0,0002 \dots 0,0003 \text{ м}^2 \times \text{°C}/\text{Вт}$).

10. По результатам расчетов делают соответствующие выводы.

5. Теплофизические свойства водных растворов поваренной соли и сахара

Теплоёмкость

Соль поваренная:

$$c = 870 \times \frac{x}{100} + 4190 \times \frac{100-x}{100}, \text{ Дж}/(\text{кг} \times \text{°C}). \quad (17)$$

Сахар:

$$c = 4190 - (2500 - 7,5 \times t) \times \frac{x}{100}, \text{ Дж}/(\text{кг} \times \text{°C}), \quad (18)$$

где x – концентрация раствора, %;

t – температура раствора, °C.

Коэффициент теплопроводности

Соль поваренная:

$$\lambda = \lambda_{\text{в}} \times (1 - 0,00248 \times x), \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)} \quad (19)$$

Сахар:

$$\lambda = \lambda_{\text{в}} \times (1 - 0,00248 \times x) \times \left(\frac{100-x}{200}\right), \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}, \quad (20)$$

где x – концентрация раствора, %;

$\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воды $\lambda_{\text{в}} \approx 0,68 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$.

Коэффициент поверхностного натяжения

$$\sigma \approx \sigma_{\text{в}} \sqrt{\frac{100-x}{x}}, \text{ Дж/м}^2, \quad (21)$$

где x – концентрация раствора, %;

$\sigma_{\text{в}}$ – коэффициент поверхностного натяжения воды
($\sigma_{\text{в}} \approx 0,0589 \text{ Дж/м}^2$).

Таблица 1

Значения температурной депрессии для водных растворов
поваренной соли и сахара при атмосферном давлении

Вещество	Концентрация раствора, %					
	5	10	15	20	25	30
Соль	0,9	1,9	3,2	4,9	6,9	9,6
Сахар	0,1	0,2	0,3	0,4	0,54	0,7

Таблица 2

Плотность раствора поваренной соли: ρ , кг/м³

t	Концентрация раствора, %									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
10	1014	1029	1044	1059	1074	1089	1104	1120	1136	1152
20	1012	1026	1041	1055	1070	1085	1100	1116	1131	1147
30	1009	1023	1037	1051	1066	1081	1096	1111	1127	1142
40	1005	1019	1033	1047	1062	1076	1091	1106	1122	1137
50	1001	1015	1029	1043	1067	1072	1086	1101	1116	1132
60	996	1010	1024	1038	1052	1066	1081	1096	1111	1126
70	991	1005	1019	1033	1047	1061	1076	1091	1106	1121
80	985	998	1012	1026	1040	1054	1069	1084	1099	1114
90	979	992	1006	1020	1033	1049	1063	1078	1093	1008
100	971	985	999	1013	1027	1042	1056	1071	1086	1101
110	965	979	993	1007	1021	1036	1050	1065	1080	1095

Таблица 3

Плотность раствора сахара: ρ , кг/м³

t	Концентрация раствора, %									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
10	1012	1020	1028	1038	1044	1052	1061	1069	1078	1087
20	1008	1016	1024	1034	1040	1048	1057	1065	1074	1083
30	1004	1012	1020	1030	1036	1044	1053	1061	1070	1080
40	1012	1016	1020	1026	1029	1033	1039	1043	1049	1055
50	996	1004	1012	1023	1029	1037	1046	1054	1063	1073
60	992	1000	1007	1019	1025	1033	1042	1051	1060	1069
70	988	997	1005	1015	1021	1030	1039	1047	1056	1066
80	984	993	1001	1011	1016	1026	1035	1043	1053	1062
90	980	989	997	1007	1014	1022	1031	1040	1049	1059
100	976	985	993	1004	1010	1018	1028	1036	1046	1055
110	972	981	989	1000	1006	1015	1024	1033	1042	1052

Таблица 4

Вязкость раствора поваренной соли: μ , мПа $\times$ с

t	Концентрация раствора, %				
	5	10	15	20	25
10	1,39	1,51	1,69	1,99	2,38
20	1,07	1,19	1,34	1,54	1,86
30	0,87	0,95	1,07	1,24	1,46
40	0,71	0,78	0,89	1,03	1,20
50	0,60	0,67	0,75	0,87	1,05
60	0,51	0,57	0,64	0,74	0,91
70	0,45	0,51	0,56	0,64	0,77
80	0,405	0,465	0,5	0,57	0,67
90	0,375	0,425	0,45	0,515	0,58
100	0,35	0,4	0,42	0,46	0,51
110	0,335	0,38	0,40	0,42	0,45

Таблица 5

Вязкость раствора сахара: μ , мПа $\times$ с

t	Концентрация раствора, %					
	5	10	15	20	25	30
10	1,355	1,745	2,24	3,14	4,12	5,76
20	1,096	1,221	1,56	2,05	2,75	3,68
30	0,931	0,949	1,18	1,51	1,92	2,44
40	0,722	0,843	0,972	1,215	1,52	1,90
50	0,619	0,660	0,789	0,974	1,20	1,48
60	0,507	0,576	0,677	0,824	1,00	1,22
70	0,467	0,509	0,586	0,704	0,845	1,01
80	0,385	0,448	0,502	0,588	0,690	0,809
90	0,353	0,394	0,456	0,517	0,587	0,667
100	0,343	0,386	0,434	0,488	0,549	0,618
110	0,337	0,369	0,403	0,44	0,481	0,525

Вопросы для контроля самостоятельной работы

1. Дайте определение процессу выпаривания.
2. Как может осуществляться процесс выпаривания?
3. Напишите уравнения материального баланса процесса выпаривания.
4. Напишите общее уравнение теплового баланса процесса выпаривания.
5. Как определить температуру кипения раствора при известной температуре вторичного пара?
6. Перечислите основные элементы лабораторной установки.
7. Какие величины измеряются в ходе проведения лабораторной работы?
8. Как определяется расход исходного раствора?
9. От каких факторов зависит коэффициент теплоотдачи кипящего раствора?
10. Что называется тепловой нагрузкой аппарата?
11. Дайте определение плотности теплового потока.
12. Как изменяются свойства раствора при выпаривании?
13. Чем принципиально различаются однокорпусное и многокорпусное выпаривание?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ

Цели работы

1. Изучение процесса ректификации в колонне периодического действия.
2. Определение числа теоретических тарелок в колонне и КПД тарелки.
3. Определение основных технико-экономических показателей работы колонны: расхода тепла и расхода воды.

1. Основы теории и постановка задачи исследования

Перегонка и ректификация применяются в спиртовой, винодельческой, микробиологической, витаминной и других отраслях пищевой промышленности для разделения жидких смесей на технически чистые продукты, для повышения концентрации одного из продуктов, а также для очистки продуктов от примесей.

Разделение жидких смесей этим методом основано на различной летучести компонентов смеси. Один из компонентов, имеющий большую летучесть, называется низкокипящим компонентом (НKK), а другой, имеющий меньшую летучесть, – высококипящим компонентом (ВKK).

При кипении смесей жидких компонентов НKK в большей мере переходит в пар, и если этот пар сконденсировать, то жидкость (дистиллят) будет обогащена НKK. Однако при помощи однократной перегонки не удастся достичь достаточно полного разделения компонентов. Такое разделение осуществляется путем многократного контакта между паром и жидкостью, при этом многократно происходят процессы испарения и конденсации. Этот процесс называется ректификацией.

Схема потоков пара и жидкости в ректификационной установке изображена на рис. 1. Через ректификационную колонну движутся противотоком неравновесные по составу потоки пара и жидкости: поток пара поднимается снизу вверх, а жидкость стекает сверху вниз. Для создания хорошего контакта жидкости и пара внутри колонны располагают контактные эле-

менты (тарелки или насадку в виде твердых тел специальной геометрической формы).

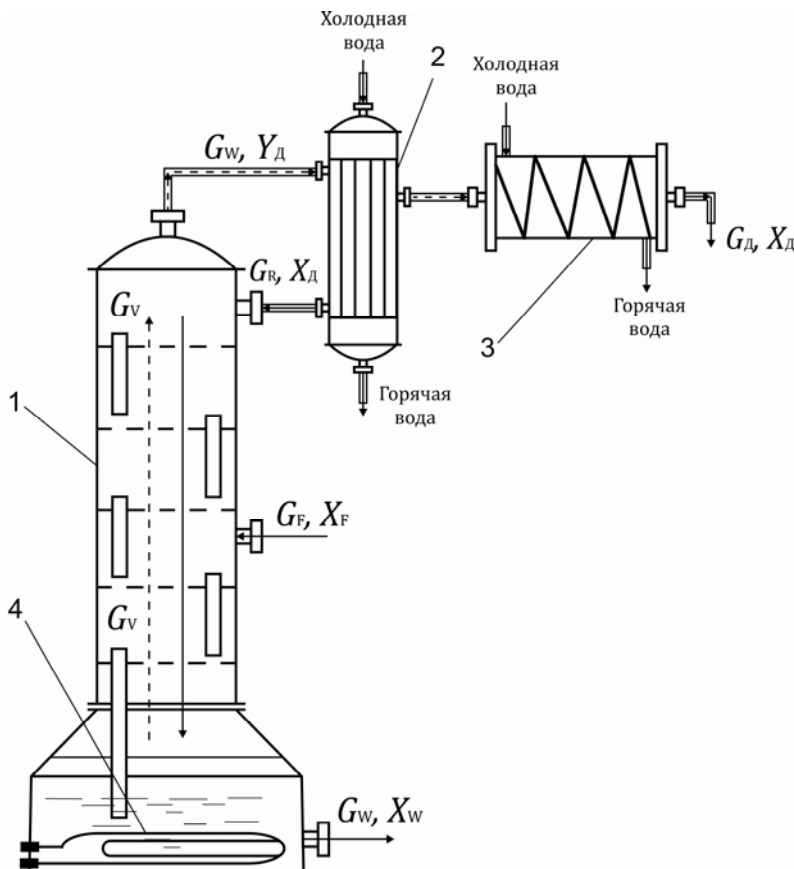


Рис. 1. Схема потоков пара и жидкости в ректификационной установке:

- 1 – ректификационная колонна; 2 – холодильник-дефлегматор;
3 – холодильник дистиллята; 4 – подогреватель.

Поток жидкости —; поток пара -----.

G_F – подача исходной смеси, G_D – отбор дистиллята, G_R – подача флегмы на орошение, G_W – выход кубового остатка, G_V – выход паров в дефлегматор, X_F, X_D, X_W – концентрация НКК в исходной смеси, дистилляте и кубовом остатке (мольные доли)

Схема одноколпачковой тарелки показана на рис. 2. Данный рисунок иллюстрирует, что взаимодействие между паром и жидкостью в тарельчатых ректификационных колоннах осуществляется во время барботажа, т.е. прохождение пузырей и струй пара через слой жидкости на тарелке. При работе такой колонны пар и жидкость вступают в контакт друг с другом на каждой тарелке, в результате чего происходит тепломассообмен между паром и жидкостью, и, как следствие, изменяются составы пара и жидкости: пар обогащается НКК, а жидкость – ВКК.

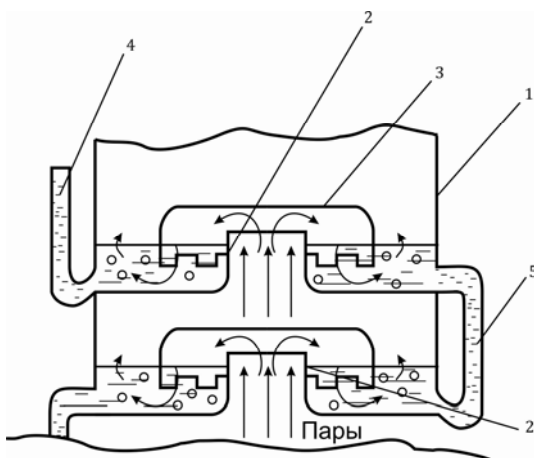


Рис. 2. Схема одноколпачковой тарелки:
1 – корпус колонны; 2 – паровой патрубок; 3 – колпачок;
4 и 5 – проточные трубы для жидкости

Для обеспечения хорошего контакта жидкости и пара колонна орошается сверху жидкостью, которая получается при конденсации паров, покидающих колонну сверху (см. рис. 1). Этот конденсат называется флегмой. Он содержит в основном НКК. Жидкость, оставшаяся в нижней части колонны, содержит главным образом ВКК и называется кубовым остатком. Жидкость, подаваемая для разделения в колонну, называется исходной смесью. Жидкость, которая получается при конденсации паров, по-

кидающих колонну сверху, и отбираемая в качестве готового продукта, называется дистиллятом (ректификатом). Отношение количества (расхода) флегмы к количеству (расходу) дистиллята называется флегмовым числом: $R = G_R/G_D$ (см. рис. 1).

Материальный баланс колонны. Для анализа работы колонны необходимо составить материальные балансы потоков. Уравнения материальных балансов по всему веществу имеют следующий вид:

$$\text{без дефлегмации } G_F = G_D + G_W; \quad (1)$$

$$\text{с дефлегмацией } G_F + G_R = G_V + G_W. \quad (2)$$

Материальный баланс по НКК равен:

$$G_F \times X_F = G_D \times X_D + G_W \times X_W. \quad (3)$$

При расчете ректификационной колонны необходимо знать количество ступеней изменения концентрации, которое требуется для увеличения концентрации НКК от начальной X_F до концентрации дистиллята X_D . Это количество ступеней называют так же числом теоретических тарелок n_T . Число действительных тарелок n_D можно определить из соотношения $\eta = n_T/n_D$, где η – КПД тарелки. Число теоретических тарелок можно определить графическим методом (рис. 3) при построении ступенчатой линии между линией равновесия 1 и рабочими линиями 2 и 3. Кривую равновесия строят по справочным данным о равновесных составах паровой и жидкой фаз по НКК.

Уравнения рабочих линий колонны непрерывного действия имеют вид:

$$\text{для верхней части колонны } y = \frac{R}{R+1} \times X + \frac{X_D}{R+1}, \quad (4)$$

$$\text{для нижней части колонны } y = \frac{f+1}{f+R} \times X - \frac{X_W}{f+R}, \quad (5)$$

где R – флегмовое число;

$f = \frac{G_F}{G_D}$ – отношение количества исходной смеси к дистилляту.

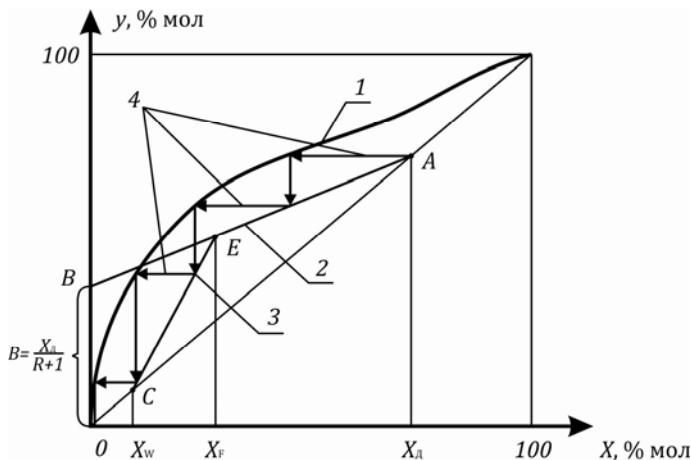


Рис. 3. Графическое определение числа теоретических тарелок для колонны непрерывного действия:

- 1 – равновесная линия (строится по справочным данным);
- 2 – рабочая линия верхней части колонны; 3 – рабочая линия нижней части колонны; 4 – ступени изменения концентрации (теоретические тарелки)

Чтобы построить рабочие линии, нужно определить величину отрезка $B = \frac{X_d}{R+1}$ и отложить ее на оси Y (точка B).

Вторую точку (A) получают на диагонали, восстанавливая ординату от оси X с концентрацией X_d . Рабочая линия верхней части колонны – отрезок AE . Точку E получают на пересечении линии AB и ординаты, восстановленной из точки X_f на оси абсцисс. Рабочая линия нижней части колонны – отрезок EC . Точку C получают на диагонали при пересечении ее с ординатой, восстановленной из точки X_w на оси абсцисс. Построение ступенчатой линии между рабочими линиями и равновесной начинают от точки A .

Для колонны периодического действия (рис. 4) также строят равновесную линию, определяют отрезок $B = \frac{X_d}{R+1}$ и откладывают его на оси OY (точка B). Затем соединяют конец этого отрезка с точкой на диагонали, полученной при пересечении

ординаты X_D с диагональю (точка А). Эта линия АВ и есть рабочая линия колонны. Затем восстанавливают перпендикуляр из точки X_F на оси абсцисс до линии равновесия (точка Р) и находят число теоретических тарелок η_T , необходимых для укрепления паров от концентрации X_F до X_D , как число ступеней между кривой равновесия и рабочей линией, начиная построение от точки Р (см. рис. 4). КПД тарелки находят по отношению $\eta = n_T/n_D$.

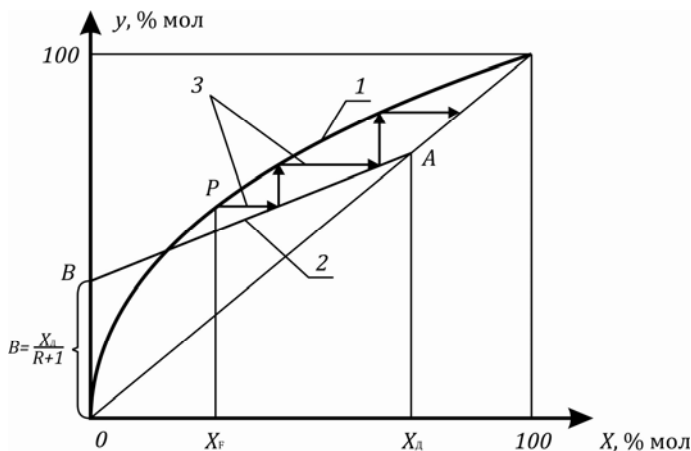


Рис. 4. Графическое определение числа теоретических тарелок в колонне периодического действия:

1— равновесная линия; 2 — рабочая линия; 3 — ступени изменения концентрации (теоретические тарелки)

Тепловой баланс колонны. Для проведения процесса ректификации необходимо тепло, затраты которого во многом зависят от величины флегмового числа. Расход тепла находят из уравнения теплового баланса (рис. 5). Тепло поступает в установку:

- с исходной смесью $Q_1 = G_F \times c_F \times t_F$, (6)
- с флегмой $Q_2 = R \times G_D \times c_D \times t_D$, (7)
- от источника обогрева Q_3 .

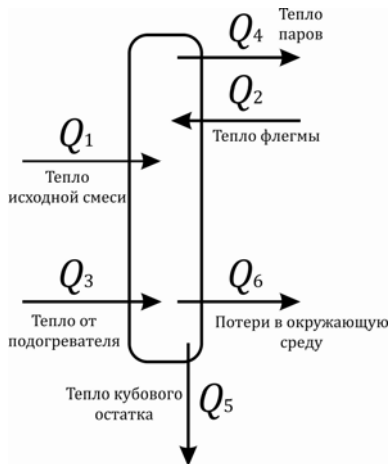


Рис. 5. К составлению теплового баланса ректификационной колонны

Тепло из колонны уходит:

- с парами $Q_4 = (R + 1) \times G_V \times i_{\text{паров}}$, (8)

- с кубовым остатком $Q_5 = G_W \times c_W \times t_W$, (9)

- с потерями в окружающую среду $Q_6 = 0,05 \times Q_3$. (10)

Приравняв приход и расход тепла, получают уравнение теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (11)$$

или

$$\begin{aligned} G_F \times c_F \times t_F + R \times G_D \times c_D \times t_D + Q_3 = \\ = (R + 1) \times G_V \times i_{\text{паров}} + G_W \times c_W \times t_W + 0,05 \times Q_3. \end{aligned} \quad (12)$$

Из уравнения теплового баланса находят тепло, затрачиваемое на процесс ректификации Q_3 :

$$\begin{aligned} Q_3 = 1.05 \times [(G_D \times i_{\text{паров}} + R \times G_D (i - c_D \times t_D) + \\ + R \times c_D \times r_D - G_F \times c_F \times t_F]. \end{aligned} \quad (13)$$

Другим важным технологическим показателем работы ректификационной установки является **расход воды** для конденсации паров в дефлегматоре и охлаждения дистиллята. Охла-

ждающая вода обычно проходит последовательно через дефлегматор и холодильник дистиллята (холодильник дистиллята на рис. 1 не показан). Расход воды определяют из уравнения теплового баланса дефлегматора и холодильника:

$$Q_{def} + Q_{хол} = G_в \times c_в \times (t_в^к - t_в^н), \quad (14)$$

$$Q_{def} = R \times G_д \times i - R \times G_д \times c_д \times t_д = R \times G_д \times r_д, \quad (15)$$

$$Q_{хол} = G_д \times c_д \times (t_д - t_д^к) + G_д \times r_д, \quad (16)$$

где $Q_{хол}$ – тепловая нагрузка холодильника;

Q_{def} – тепловая нагрузка дефлегматора.

Подставив Q_{def} и $Q_{хол}$, получим уравнение для нахождения расхода воды:

$$G_в = \frac{(1+R) \times G_д \times r_д + G_д \times c_д \times (t_д - t_д^к)}{c_в \times (t_в^к - t_в^н)}. \quad (17)$$

2. Описание установки

Схема ректификационной установки периодического действия представлена на рис. 6. Ректификационная установка состоит из куба 1, колонны 2 с одноколпачковыми тарелками 3 (20 тарелок), дефлегматора-конденсатора 4, крана-делителя флегмы 5, холодильника дистиллята 6, подогревателя 7, приемника дистиллята 8. Куб колонны снабжен штуцером 9 для загрузки исходной смеси, штуцером 10 для слива кубового остатка. Температуру кипения исходной смеси измеряют термометром 11. Температура паров, покидающих колонну сверху, фиксируется термометром 12. Термометром 13 определяют температуру паров в холодильнике-дефлегматоре 4, температуру подогретой воды на его выходе измеряют термометром 14. Температуру холодной воды на входе в холодильник дистиллята показывает термометр 15. Расход воды, идущей на охлаждение дистиллята, измеряют при помощи ротаметра 16. Подлежащая разделению смесь заливается в куб колонны, образующиеся пары проходят колонну и поступают в холодильник-дефлегматор 4, где полностью конденсируются. Часть сконденсированной жидкости поступает через холодильник 6 в сборник дистиллята 8, а другая часть (флегма) возвращается в верхнюю часть ко-

лонны 2. Расходы флегмы и дистиллята можно регулировать краном-делителем флегмы 5.

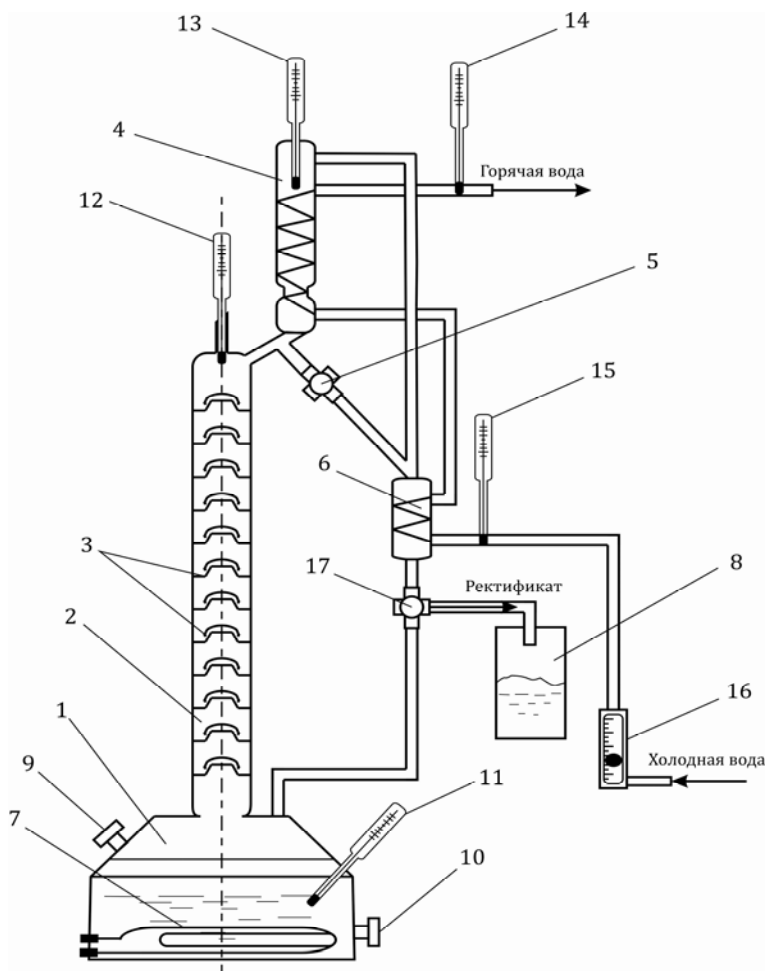


Рис. 6. Схема лабораторной установки:

- 1 – перегонная колба (куб); 2 – тарельчатая колонна;
- 3 – одноколпачковые тарелки; 4 – холодильник-дефлегматор; 5 – кран-делитель флегмы; 6 – холодильник дистиллята; 7 – подогреватель;
- 8 – приёмник дистиллята; 9, 10 – штуцера на перегонной колбе;
- 11, 12, 13, 14, 15 – термометры; 16 – ротаметр; 17 – кран

3. Методика проведения работы

1. В куб-испаритель 1 через штуцер 9 с помощью воронки заливают определенное количество (по заданию преподавателя) исходной смеси (водно-спиртовой раствор или водный раствор уксусной кислоты), предварительно определяют концентрацию этой смеси по плотности или по коэффициенту преломления. Штуцер закрывают.

2. Подают воду в холодильник-дефлегматор 4 и холодильник дистиллята 6. Кран-делитель флегмы 5 закрыт.

3. Включают подогреватель 7 перегонной колбы 1. После появления паров в холодильнике-дефлегматоре 4 нагрев продолжают при закрытом кране-делителе флегмы 5 примерно 30 мин. При этом тарельчатая колонна 2 работает «на себя».

4. Открывают кран-делитель флегмы 5 и устанавливают заданное флегмовое число, как отношение количества капель в минуту, возвращаемое в колонну, к количеству капель в минуту, отбираемому в виде дистиллята.

5. Проводят отбор двух проб дистиллята (каждая по 50–100 мл). Данные записывают в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные данные

Наименование проб	Объем	Коефф. преломления	Конц-я в масс. %	Конц-я в мольн. %	Плотность	Масса	
						общая	спирта
Исходная смесь							
1-я проба							
2-я проба							
1-й остаток							
2-й остаток							

6. Измеряют температуры в перегонной колбе 1 колонны, воды (на входе и выходе), дистиллята, расход воды на охлаждение G_c измеряют при помощи ротаметра 16, определяют время от начала до конца отбора проб τ . Данные заносят в таблицу 2 (не указанные в табл. 2 величины записывают под табл. 2).

Таблица 2

Данные по измеренным температурам

Температура, °С	До отбора	После 1-й пробы	После 2-й пробы	Средняя
Кипящей смеси в перегонной колбе				
Паров на конденсацию				
Воды на входе				
Воды на выходе				
Дистиллята				

Дополнительно измеряемые величины:

$$G_s = \dots\dots$$

$$\tau = \dots\dots$$

После окончания опытов включают обогрев, а после охлаждения установки прекращают подачу воды.

4. Обработка опытных данных

1. Измеряют плотность проб дистиллята или коэффициент преломления и по тарировочному графику, имеющемуся на щите установки, определяют массовую концентрацию. Затем осуществляют перевод массовой концентрации в мольную концентрацию, пользуясь приложенной табл. 3.

2. По коэффициенту преломления или плотности определяют концентрацию с использованием данных, приведенных в табл. 4, и рассчитывают массу исходной смеси и спирта, содержащегося в ней. Далее рассчитывают массы отбираемых проб дистиллята и спирта в них.

3. Для каждой пробы дистиллята рассчитывают массу кубового остатка и его массовую концентрацию.

4. Строят равновесную линию для смеси в координатах $X - Y$. (Данные для построения равновесной линии берут из второго и пятого столбцов табл. 3) и отмечают на оси абсцисс значения X_F , X_D , X_W .

Таблица 3

Состав кипящей водно-спиртовой жидкости и образующегося из неё пара и температура кипения при атмосферном давлении

Состав жидкости		Температура кипения, °С	Состав пара	
спирт, % масс.	спирт, % мол.		спирт, % масс.	спирт, % мол.
0	0	0	0	0
10	4,16	91,3	52,2	29,92
20	8,92	87,0	65,0	42,09
30	14,35	84,7	71,3	49,30
40	20,68	83,1	74,6	53,46
50	28,12	81,9	77,0	56,71
60	36,98	81,0	79,5	60,29
70	47,74	80,2	82,1	64,21
80	61,02	79,5	85,8	70,29
90	77,88	78,5	91,3	80,42
95,57	89,41	78,15	95,57	89,41

Таблица 4

Соотношение объемных и массовых процентов и величины плотности водно-спиртовых смесей

% _{об}	% _{масс}	Плотность, кг/м ³
0	0,00	998
10	8,01	985
20	16,21	973
30	24,64	962
40	33,30	948
50	42,43	931
60	53,09	909
70	62,39	885
80	73,48	859
90	85,66	829
100	100	789

5. Строят рабочие линии колонны периодического действия для нескольких значений X_F и X_D (порядок построения представлен выше).

6. Графическим методом определяют число теоретических тарелок n_T .

7. Рассчитывают коэффициент полезного действия тарелки. Отмечают его изменение (количество действительных тарелок подсчитывают на лабораторной установке).

8. Рассчитывают суммарный расход воды в дефлегматоре и холодильнике по уравнению (17) и сравнивают его с действительным.

Вопросы для контроля самостоятельной работы

1. Для каких целей используется процесс ректификации?
2. Взаимодействие между паром и жидкостью при ректификации.
3. Типы ректификационных аппаратов.
4. Основные понятия и определения: исходная смесь, дистиллят, кубовой остаток, флегма, флегмовое число, равновесная и рабочие линии, уравнения рабочих линий.
5. Уравнения материальных балансов.
6. Определение числа теоретических и действительных тарелок.
7. Что такое КПД тарелки?
8. Определение минимального числа теоретических тарелок.
9. Для чего нужен дефлегматор?
10. Определение расхода тепла на обогрев и расхода воды в дефлегматоре.
11. Как влияет флегмовое число на работу ректификационной колонны?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цели работы

1. Ознакомление с особенностями конвективной сушки.
2. Изучение кинетики процесса сушки.
3. Освоить методику построения кривых сушки и скорости сушки.

1. Основы теории и постановка задачи исследования

Процесс сушки состоит в удалении влаги из материалов путём ее диффузии и испарения. Это происходит за счет подвода тепла к высушиваемому телу. Необходимость удаления влаги из материала может быть обусловлена разными причинами:

- влажный продукт портится при хранении, так как влага вредно воздействует на его товарные свойства: слёживание, смерзание, образование плесени;
- влажность продуктов может быть вредна на некоторых стадиях переработки, ухудшая их качество;
- перевозка высушенного материала потребителю, особенно на дальние расстояния, обходится дешевле, чем влажного – более тяжелого.

По способу подвода энергии к высушиваемому материалу различают следующие виды сушки:

- конвективная – путем непосредственного соприкосновения высушиваемого материала с сушильным агентом, в качестве которого обычно используют нагретый воздух или топочные газы (как правило, в смеси с воздухом);
- контактная – путем передачи тепла от теплоносителя к материалу через разделяющую их стенку;
- радиационная – путем передачи тепла инфракрасными лучами;
- диэлектрическая – путем нагревания в поле токов высокой частоты;

- сублимационная – сушка в замороженном состоянии при глубоком вакууме.

Статика сушки. При контакте материала с влажным воздухом возможны два процесса: 1) высушивание влажного материала происходит, в случае если парциальное давление пара над поверхностью материала p_M превышает его парциальное давление в воздухе или газе p_P , т.е. $p_M > p_P$; 2) увлажнение твердого материала происходит, если $p_M < p_P$.

В процессе сушки величина p_M уменьшается и приближается к пределу $p_M = p_P$. При этом наступает состояние динамического равновесия, которому соответствует предельная влажность материала, называемая равновесной. Равновесная влажность зависит от парциального давления водяного пара над материалом p_M или пропорциональной ему величины относительной влажности воздуха φ и определяется опытным путем. Поэтому с помощью такого сушильного агента, как воздух (с определенной относительной влажностью), из материала невозможно удалить всю влагу.

Различают свободную и связанную влагу в материале. Под свободной понимают влагу, скорость испарения которой из материала равна скорости испарения воды со свободной поверхности ($p_M = p_H$), где p_H – давление насыщенного водяного пара. Скорость испарения связанной влаги из материала всегда меньше скорости испарения воды со свободной поверхности. При этом $p_M < p_H$.

Для характеристики содержания влаги в материале используется понятие **влажность материала** w , означающее содержание влаги, выраженное в процентах от массы влажного материала:

$$w = \frac{m_{вл}}{m} \times 100 \%, \quad (1)$$

где $m_{вл}$ – масса воды, кг;
 m – общая масса материала, кг.

В ряде случаев, например, при изучении кинетики сушки, более удобно относить влагу к абсолютно сухому веществу. В этом случае влагосодержание w_c , представляет собой содержание влаги в килограммах на 1 кг материала:

$$w_c = \frac{m_{\text{вл}}}{m - m_{\text{вл}}} \times 100 \%. \quad (2)$$

Виды связи влаги с материалом. Механизм процесса сушки в значительной степени определяется формой связи влаги с материалом. Чем прочнее эта связь, тем труднее протекает процесс сушки. При сушке связь влаги с материалом нарушается. Существует следующая классификация форм связи влаги с материалом:

- 1) химическая (ионная, молекулярная);
- 2) физико-химическая (адсорбционная, осмотическая, структурная);
- 3) механическая (влаги в капиллярах и макрокапиллярах, влага смачивания).

Наиболее прочным видом связи влаги является химическая. Последняя удаляется только при нагревании материала до высокой температуры (прокаливании) или химическом воздействии. Наиболее легко может быть удалена механически связанная влага. Она содержится в капиллярах тела и на его поверхности.

В процессе сушки удаляется, как правило, только влага, связанная с материалом физико-химически и механически.

Кинетика сушки. При сушке влажных материалов влага перемещается в материале по направлению от центра кусков материала к периферии, где материал омывается сушильным агентом. Это в основном диффузионный процесс, движущей силой которого является разность между концентрациями влаги в различных точках материала. Однако он усложняется тепловым воздействием на материал.

Масса влаги m_w , прошедшей через поверхность F за время τ при градиенте концентрации dc/dx :

$$m_w = -K_w \times F \times (dc/dx) \times \tau, \quad (3)$$

где K_w – коэффициент, зависящий от характера связи влаги с материалом и от его характеристик.

В материале влага может перемещаться в виде жидкости и в виде пара. При большой влажности материала преобладает миграция влаги в виде жидкости.

Перемещение влаги внутри продукта происходит также под действием температурного градиента и имеет направление теплового потока, при этом проявляется действие термовлагопроводности. Например, если нагрев продукта осуществляется с его поверхности, то влага под действием температурного градиента перемещается от периферии к центру.

Масса влаги, которая перемещается под действием температурного градиента dt/dx :

$$m_t = -K_t \times F \times \left(\frac{dt}{dx} \right) \times \tau, \quad (4)$$

где K_t – коэффициент, аналогичный K_w .

Таким образом, суммарное количество перемещаемой влаги при наличии разности ее концентраций и температурного градиента будет равно:

$$m = m_w - m_t, \quad (5)$$

где m – общее количество диффундируемой влаги, кг.

Для того, чтобы уменьшить эффект термовлагопроводности, продукт при сушке необходимо по возможности измельчать.

Кривая сушки и скорости сушки. Наблюдая за изменением массы материала в процессе сушки, строят кривую сушки (рис. 1) в координатах: влагосодержание материала в массовых процентах w_c – время в минутах или часах τ . В начале сушки в течение небольшого промежутка времени линия сушки имеет вид кривой прогрева материала (отрезок АВ). Затем начинается первый период постоянной скорости сушки. В этот период линия сушки имеет вид прямой. Температура материала в данный отрезок времени принимает значение, равное температуре мокрого термометра t_m (отрезок ВС). В первую фазу сушки происходит удаление свободной влаги. Когда свободная влага полностью удалена, наступает второй период –удаления связанной влаги. В точке С, соответствующей определенной влажности материала, характер линии сушки изменяется. Она становится кривой, асимптотически приближающейся к значению w_{cp} – равновесной влажности при заданных условиях сушки. Во вто-

ром периоде скорость сушки непрерывно уменьшается. Форма линии сушки зависит от вида связи влаги с материалом и его структуры, т. е. от условий перемещения влаги внутри продукта. При достижении равновесной влажности прекращается удаление влаги из материала. Температура материала равна температуре окружающего его теплоносителя (точка Е). Однако для достижения равновесной влажности требуется значительное время.

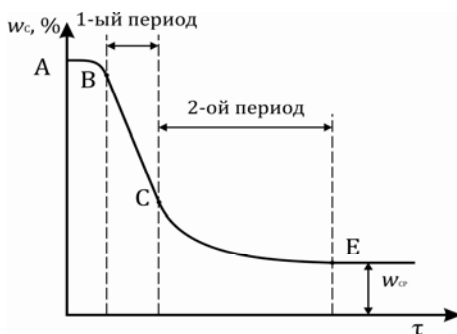


Рис. 1. Кривая сушки

На основании кривых сушки можно построить кривые скорости сушки (рис. 2). Для этого по оси абсцисс откладывают содержание влаги в материале, по оси ординат – скорость сушки, представляющую собой изменение влагосодержания за единицу времени $dw_c/d\tau$.

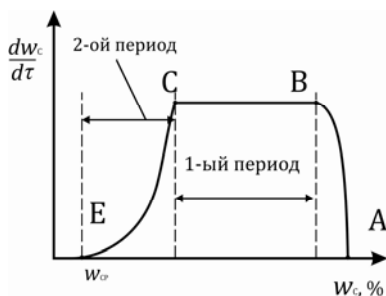


Рис. 2. Кривая скорости сушки

Скорость сушки для данной влажности материала выражается тангенсом угла наклона касательной, проведенной к точке кривой сушки.

Вид кривых скорости сушки во втором периоде может значительно отличаться, в зависимости от форм связи влаги с материалом.

Уравнения скорости сушки. В первый период сушки удаляется свободная влага, испарение которой можно рассматривать как испарение воды со свободной поверхности. При уменьшении влажности материала вплоть до первой критической точки парциальное давление пара в поверхностной пленке не изменяется. Поэтому движущей силой процесса на первом этапе сушки будет разность парциальных давлений насыщенного пара в пограничном паровом слое p_H и окружающей среде p_B , т.е. $(p_H - p_B)$, тогда скорость сушки выражается уравнением:

$$U = dw_c/d\tau = 0,0745(V_v \times \rho^{0,8} \times (p_H - p_B)). \quad (6)$$

Таким образом, в первый период скорость сушки, отнесенная к единице поверхности, зависит от $(p_H - p_B)$, плотности сушильного агента ρ и его скорости V_v .

Следовательно, в первый период определяющими факторами являются параметры сушильного агента. Скорость диффузии влаги внутри материала не определяет интенсивности испарения.

Во втором периоде сушки кинетические закономерности более сложные, что видно из кривых скорости сушки. В этот отрезок времени начинает удаляться связанная вода. При этом парциальное давление водяных паров на поверхности материала становится меньше давления паров чистой воды при той же температуре. На данном этапе давление водяного пара является функцией температуры материала и его влажности на поверхности. Последняя же зависит от скорости перемещения влаги в материале. Значит, скорость сушки в рассматриваемое время зависит не только от диффузии влаги в окружающий воздух, но также от теплопроводности материала. Таким образом, во втором периоде скорость сушки определяется явлениями, связанными с перемещением влаги внутри материала. Допустим, что в этой фазе суш-

ки движущей силой является разность между влажностью материала w и равновесной влажностью w_{cp} . Тогда скорость сушки во втором периоде выразится следующим образом:

$$U = \frac{dw_c}{d\tau} = K \times (w - w_p), \quad (7)$$

где K – коэффициент сушки, характеризующий интенсивность влагообмена.

Материальный баланс реального процесса сушки. К числу определяемых относят количество удаляемой в единицу времени влаги W , кг/с и расход сушильного агента L , кг/с. Количество удаляемой влаги определяют из уравнения материального баланса:

$$m_H = m_K + W, \quad (8)$$

где m_H – количество влажного материала, поступающего на сушку, кг/с;

m_K – количество высушенного материала, кг/с.

$$W = m_H - m_K. \quad (9)$$

Также количество удаляемой влаги можно определить:

$$W = m_H \times \frac{w_H - w_K}{100 - w_K}, \quad (10)$$

где w_H, w_K – начальная и конечная влажность материала, %.

Из уравнения материального баланса по влаге, определяют расход сухого воздуха на сушку L :

$$W + L \times x_1 = L \times x_2. \quad (11)$$

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1}, \quad (12)$$

где x_1 и x_2 – влагосодержание воздуха на входе и выходе из сушильной камеры, кг/кг сухого воздуха.

Удельный расход воздуха на испарение из материала 1 кг влаги равен:

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_1}. \quad (13)$$

Тепловой баланс конвективной сушилки. Для составления уравнения теплового баланса введем обозначения:

m_H – количество влажного материала, поступающего в сушилку, кг/с;

m_K – количество высушенного материала, кг/с;

W – количество испаряемой влаги, кг/с;

c_M – удельная теплоемкость высушенного материала, Дж/кг К;

c_B – удельная теплоемкость влаги, Дж/кг К;

t_H – температура материала на входе в сушилку, °С;

t_K – температура материала на выходе из сушилки, °С;

L – количество абсолютно сухого воздуха, кг/с .

При составлении уравнения теплового баланса следует учитывать, что в сушилке могут быть транспортные устройства, на которых находится высушиваемый материал (например, транспортер, вагонетки и т.п.) и на нагревание которых расходуется тепло. Для транспортных устройств введем следующие обозначения:

m_{TR} – масса транспортных устройств, кг;

c_{TR} – удельная теплоемкость их материала, Дж/кг К;

t_{TR}^H – температура транспортных устройств на входе в сушилку, °С;

t_{TR}^K – температура транспортных устройств на выходе из сушилки, °С.

Обычно в конвективные сушилки тепло Q_{OK} подводится из основного калорифера, установленного перед сушильной камерой, и от дополнительного калорифера (в случае необходимости), находящегося внутри сушильной камеры Q_{DK} .

Составим приход и расход тепла, поступающего на сушку, с учетом потерь тепла в окружающую среду $Q_{пот}$.

Приход тепла	Расход тепла
1. Со свежим воздухом: Li_0 .	1. С отработанным воздухом: Li_2 .
2. С влажным материалом:	2. С высушенным материалом:

Приход тепла	Расход тепла
а) с высушенным материалом: $m_K c_M t_K$;	$m_K c_M t_K$.
б) с влагой, испаряемой из материала: $W c_B t_H$.	
3. С транспортными устройствами: $m_{TP} c_{TP} t_{TP}^H$.	3. С транспортными устройствами: $m_{TP} c_{TP} t_{TP}^K$.
4. От основного калорифера Q_{OK} .	4. Потери тепла в окружающую среду: $Q_{ПОТ}$.
5. От дополнительного калорифера $Q_{ДК}$.	

Сложив приход и расход тепла, получим уравнение теплового баланса установившегося процесса конвективной сушки:

$$L \times i_0 + m_K \times c_M \times t_H + W \times c_B \times t_H + m_{TP} \times c_{TP} \times t_{TP}^H + Q_{OK} + Q_{ДК} = L \times i_2 + m_K \times c_M \times t_K + m_{TP} \times c_{TP} \times t_{TP}^K + Q_{ПОТ}. \quad (14)$$

Из этого уравнения можно определить общий расход тепла на сушку $Q_{OK} + Q_{ДК}$:

$$Q_{OK} + Q_{ДК} = L (i_2 - i_0) + m_K \times c_M (t_K - t_H) + m_{TP} \times c_{TP} (t_{TP}^K - t_{TP}^H) - W \times c_B \times t_H + Q_{ПОТ}. \quad (15)$$

2. Описание установки

Схема лабораторной установки изображена на рис. 3.

Установка, предназначенная для конвективной сушки влажных материалов, включает весы и конвективную сушилку, состоящую из калорифера 1 и сушильной камеры 2. На калорифере установлены: термометр 3 для измерения температуры воздуха, регулятор температуры 4 и тумблер включения установки 5.

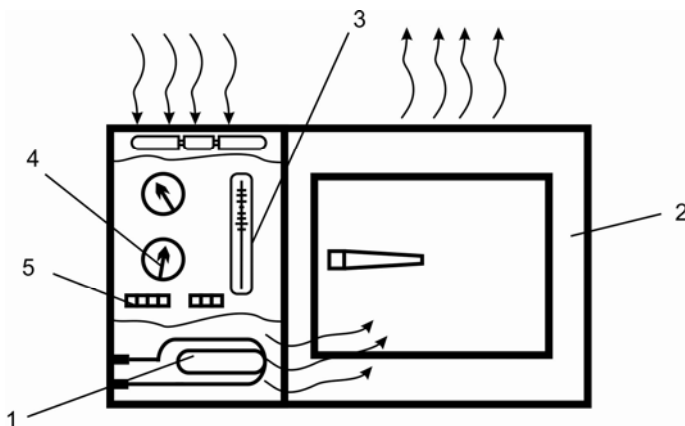


Рис. 3. Схема лабораторной установки:
1 – подогреватель (калорифер); 2 – сушильная камера; 3 – термометр;
4 – регулятор температуры; 5 – тумблер

3. Методика проведения работы

1. Заготавливают 10 образцов из влажного материала, подлежащего сушке G_i , и взвешивают их на весах (образцы должны быть примерно одинаковые по массе). Готовят 11-й – контрольный образец $G_{\text{контр}}^n$ – для определения начальной влажности. Результаты взвешиваний записывают в табл. 1.

2. Исследуемые образцы нумеруют и, поместив на поддон, ставят в сушилку.

3. Включают секундомер и через определенные промежутки времени вытаскивают высушиваемые образцы с первого по десятый номер G_{ni} и взвешивают на весах.

4. Для определения начальной влажности материала контрольный образец $G_{\text{контр}}^k$ высушивают до постоянной массы (до тех пор, пока два очередных взвешивания этого образца не дадут одинакового результата).

5. Результаты взвешиваний записывают в табл. 1.

Таблица 1

Опытные и расчетные величины

№ высушиваемого образца	Время сушки τ , мин	Масса навески до сушки G , г	Масса навески после сушки G_n , г	Начальное влагосодержание материала w_{co} , %	Сухая масса навески $G_{сух}$, г	Масса влаги в навеске до сушки $G_{вл}^{дс}$, г	Масса влаги в навеске после сушки $G_{вл}$, г	Влагосодержание после сушки w_c , %	Скорость сушки $dw_c/d\tau$, %/мин
1									
2									
...									
9									
10									
Контрольный образец			масса до сушки $G_{контр}^н$						
			масса после сушки $G_{контр}^к$						

4. Обработка опытных данных

1. Определяют начальную влажность материала по формуле:

$$w_{co} = \frac{G_{вл}}{G_{контр}^к} \times 100 \%, \quad (16)$$

где $G_{вл} = G_{контр}^н - G_{контр}^к$ – масса влаги в контрольном образце, г;
 $G_{контр}^к$ – масса контрольного образца после сушки, высушенного до постоянного веса, г;

$G_{контр}^н$ – масса до сушки контрольного образца, г.

2. Рассчитывают сухую массу каждого образца материала по формуле:

$$G_{сух\ i} = \frac{G_i}{100 + w_{co}} \times 100, \quad (17)$$

где G_i – масса каждого образца влажного материала (до сушки).

3. Определяют массу влаги в каждом образце до сушки:

$$G_{вл\ i}^{d,c} = G_i - G_{сух\ i}. \quad (18)$$

4. Рассчитывают массу влаги в каждом образце высушиваемого материала после сушки:

$$G_{вл\ i} = G_{ni} - G_{сух\ i}, \quad (19)$$

G_{ni} – масса каждого образца материала после сушки.

5. Определяют влагосодержание после сушки для каждого высушиваемого образца материала:

$$w_{ci} = \frac{G_{вл\ i}}{G_{сух\ i}} \times 100\%. \quad (20)$$

Все результаты расчетов заносят в табл. 1.

6. По результатам опытов строят кривую сушки в координатах $w_c - \tau$, а затем методом графического дифференцирования строят кривую скорости сушки в координатах $w_c - \frac{dw_c}{d\tau}$.

Скоростью сушки называют изменение влагосодержания материала за единицу времени. Например, среднюю скорость сушки $\left(\frac{dw_c}{d\tau}\right)_{1-2}$ на отрезке A_1A_2 (рисунок 4) можно рассчитать по формуле:

$$\left(\frac{dw_c}{d\tau}\right)_{1-2} = \frac{w_{c1} - w_{c2}}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (21)$$

Для отрезка A_2A_3 средняя скорость сушки $\left(\frac{dw_c}{d\tau}\right)_{2-3}$ будет равна:

$$\left(\frac{dw_c}{d\tau}\right)_{2-3} = \frac{w_{c2} - w_{c3}}{\tau_3 - \tau_2}. \quad (22)$$

Полученные точки откладывают по оси скорости сушки (рис. 4) от середины соответствующих отрезков A_1A_2 , A_2A_3 и т.д. После определения всех точек кривой скорости сушки их соединяют плавной линией (см. рис. 2).

7. По кривой скорости сушки определяют скорость конвективной сушки, полученные результаты заносят в табл. 1.

8. По результатам расчетов и графических построений делают соответствующие выводы.

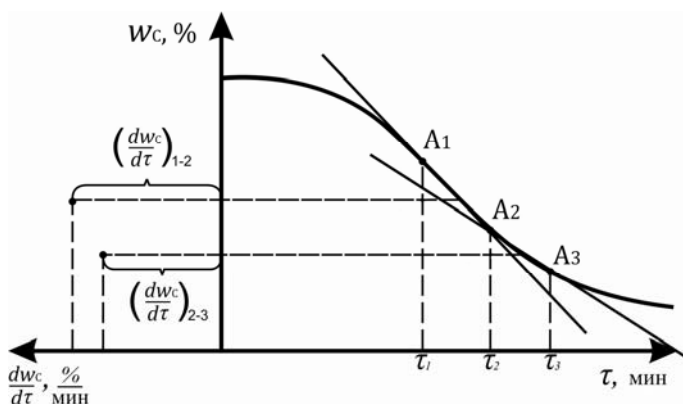


Рис. 4. Графическое изображение построения кривой скорости сушки

Вопросы для контроля самостоятельной работы

1. С какой целью производят высушивание влажных материалов?
2. Виды сушки.
3. В чем заключается статика сушки?
4. Какие существуют виды связи влаги с материалом?
5. В чем заключается кинетика сушки?
6. Что называется влагопроводностью и термовлагопроводностью?
7. Методика построения кривой сушки.
8. Методика построения кривой скорости сушки.
9. Уравнения скорости сушки.
10. Материальный баланс процесса конвективной сушки.
11. Тепловой баланс процесса конвективной сушки.
12. Основные элементы экспериментальной установки и их назначение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айнштейн, А.Г. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учеб. в 2 кн. Кн. 1 и 2. / А. Г. Айнштейн. – М.: Высшая школа, 2003. – 1757 с.
2. Бородулин, Д.М. Процессы и аппараты химической технологии: учеб. пособие для студ. спец. 240902 «Пищевая биотехнология», / Д.М. Бородулин, В.Н. Иванец; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2007. – 167 с.
3. Кавецкий, Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / Г.Д. Кавецкий, В.П. Касьяненко. – М.: КолосС, 2008. – 551 с.
4. Остриков, Н.А. Процессы и аппараты пищевых производств: учеб. для вузов / Н.А. Остриков, О.В. Абрамов, А.В. Логинов. – СПб.: Гиорд, 2012. – 616 с.
5. Остриков, Н.А. Процессы и аппараты пищевых производств: учеб. в 2 кн. Кн. 1 / Н.А. Остриков, Ю.В. Красовицкий, А.А. Шевцов, Г.В. Алексеев. – СПб.: Гиорд, 2007. – 704 с.
6. Остриков, Н.А. Процессы и аппараты пищевых производств: учеб. в 2 кн. Кн. 2 / Н.А. Остриков, Ю.В. Красовицкий, А.А. Шевцов, Г.В. Алексеев. – СПб.: Гиорд, 2007. – 608 с.
7. Панфилов, В.А. Машины и аппараты пищевых производств: учеб. в 2 кн. Кн 1 / В.А. Панфилов. – М.: Высшая школа, 2001. – 703 с.
8. Панфилов, В.А. Машины и аппараты пищевых производств: учеб. в 2 кн. Кн 2 / В.А. Панфилов. – М.: Высшая школа, 2001. – 680 с.
9. Плаксин, Ю.М. Процессы и аппараты пищевых производств: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.М. Плаксин, В.А. Ларин, Н.Н. Малахов. – М.: КолосС, 2008. – 760 с.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Бородулин Дмитрий Михайлович

**ГИДРАВЛИКА.
ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ
ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Лабораторный практикум

Для студентов, обучающихся по направлениям:

- 15.03.02 «Технологические машины и оборудование»;
- 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»;
- 20.03.01 «Техносферная безопасность»;
- 29.03.03 «Технология полиграфического и упаковочного производства»;
- 19.03.02 «Продукты питания из растительного сырья»;
- 19.03.03 «Продукты питания животного происхождения»;
- 19.03.01 «Биотехнология»;
- 19.03.04 «Технология продукции и организация общественного питания»

Редактор *Е.Н. Шуранова*

Технический редактор *Е.П. Лопатин*

Художественный редактор *Е.П. Лопатин*

ЛР № 020524 от 02.06.97

Подписано в печать 30.12.2015. Формат 60×84/16

Бумага типографская. Гарнитура Times

Уч.-изд. л. 7,25. Тираж 500 экз.

Заказ № 97

Оригинал-макет изготовлен в лаборатории множительной техники
Кемеровского технологического института пищевой промышленности
(университета)

650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 7

ПЛД № 44-09 от 10.10.99.

Отпечатано в лаборатории множительной техники
Кемеровского технологического института пищевой промышленности
(университета)

650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 7