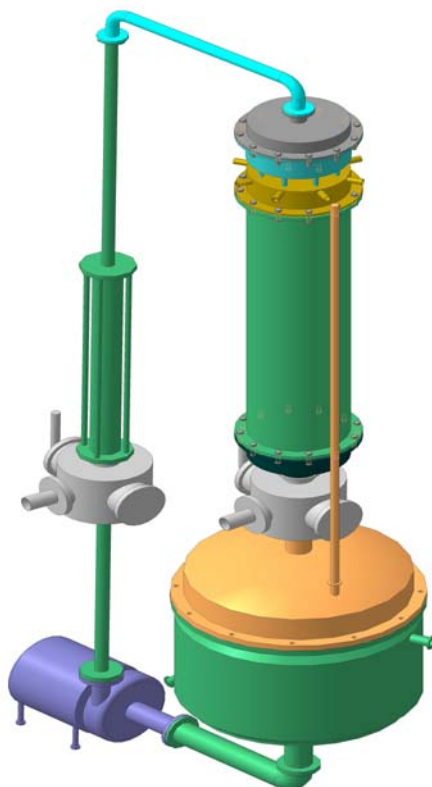


А.Г. Новоселов  
Ю.Н. Гуляева  
Ю.Л. Малахов  
А.В. Федоров

## ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ



Санкт-Петербург  
2018

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Университет ИТМО**

**А.Г. Новоселов  
Ю.Н. Гуляева  
Ю.Л. Малахов  
А.В. Федоров**

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ  
БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

**РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлениям подготовки 15.04.02 «Технологические машины и  
оборудование», 19.04.01 «Биотехнология» и 19.04.02 «Продукты питания из  
растительного сырья» в качестве учебного пособия для реализации основных  
образовательных программ  
высшего образования магистратуры**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург  
2018**

Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н., Малахов Ю.Л., Федоров А.В. Процессы и аппараты биотехнологических производств Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО. 2018 . – 51 с.

Рецензент: Беззубцева М.М. – профессор, д.т.н. заведующий кафедрой «Энергообеспечения предприятий и электротехнологии» Санкт-Петербургского аграрного университета.

В учебном пособии приведено подробное описание схем экспериментальных установок, методики проведения экспериментальных исследований и порядок обработки полученных результатов.



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

© Университет ИТМО, 2018

© Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н., Малахов Ю.Л., Федоров А.В., 2018

## Содержание

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. Культивирование хлебопекарных дрожжей в струйно–инжекционном ферментаторе (КСИФ)	
<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
1.1. Общие положения .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.2. Описание лабораторной установки по культивированию дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i> на мелассных питательных средах .....	6
1.3. Методика проведения эксперимента по культивированию хлебопекарных дрожжей при высоких концентрациях .....	9
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. Исследование процесса сушки пивных дрожжей в псевдооживленном слое инертных тел	
<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
2.1. Общие положения .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.2. Описание экспериментальной установки	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.3. Методика проведения работы .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.4. Обработка опытных данных и составление отчета ...	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. Определение коэффициента трения по длине при движении зерновой суспензии в трубопроводе .....	
<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
3.1 Общие положения .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.2. Теоретическое обоснование метода построения консистентных кривых .....	26
3.3. Описание экспериментальной установки	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.4. Подготовка зернового материала к созданию суспензий	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
<b>не определена.</b>	
3.5. Методика поведения экспериментов. ..	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.6. Методика обработки результатов экспериментов .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. Экспериментальные исследования по уносу газовой фазы свободными суспензионными струями	
<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
4.1 Общие положения .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.2 Описание экспериментальной установки по исследованию уноса газа свободными суспензионными струями.....	38
4.3 Методика определения уноса газа свободными суспензионными струями .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Список использованной литературы.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Приложения .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Приложение 1. Значения плотности водно-зерновых суспензий на основе ячменя $\rho_c$ в зависимости от температуры и гидромодуля , кг/м <sup>3</sup> .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

Приложение 2. Значения вязкости водно-зерновых суспензий на основе ячменя $\mu$ в зависимости от температуры $T$ и гидромодуля .....	<b>Ошибка!</b>
<b>Закладка не определена.</b>	
Приложение 3. ОТЧЕТНАЯ ТАБЛИЦА .....	48
Приложение 4. Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от давления .....	49
Приложение 5. Зависимость относительной влажности воздуха от температуры .....	50

## Содержание

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. Культивирование хлебопекарных дрожжей в струйно–инжекционном ферментаторе (КСИФ).....	5
1.1. Общие положения .....	5
1.2. Описание лабораторной установки по культивированию дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i> на мелассных питательных средах .....	6
1.3. Методика проведения эксперимента по культивированию хлебопекарных дрожжей при высоких концентрациях .....	9
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. Исследование процесса сушки пивных дрожжей в псевдооживленном слое инертных тел.....	16
2.1. Общие положения .....	16
2.2. Описание экспериментальной установки .....	18
2.3. Методика проведения работы.....	20
2.4. Обработка опытных данных и составление отчета .....	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. Определение коэффициента трения по длине при движении зерновой суспензии в трубопроводе .....	25
3.1 Общие положения .....	25
3.2. Теоретическое обоснование метода построения консистентных кривых .....	26
3.3. Описание экспериментальной установки .....	30
3.4. Подготовка зернового материала к созданию суспензий .....	32
3.5. Методика поведения экспериментов. ....	33
3.6. Методика обработки результатов экспериментов .....	34
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. Экспериментальные исследования по уносу газовой фазы свободными суспензионными струями.....	37
4.1 Общие положения .....	37
4.2 Описание экспериментальной установки по исследованию уноса газа свободными суспензионными струями.....	38
4.3 Методика определения уноса газа свободными суспензионными струями .....	41
Список использованной литературы.....	45
Приложения .....	46
Приложение 1. Значения плотности водно-зерновых суспензий на основе ячменя $\rho_c$ в зависимости от температуры и гидромодуля , кг/м <sup>3</sup> .....	46
Приложение 2. Значения вязкости водно-зерновых суспензий на основе ячменя $\mu$ в зависимости от температуры $T$ и гидромодуля .....	47
Приложение 3. ОТЧЕТНАЯ ТАБЛИЦА .....	48

Приложение 4. Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от давления.....	49
Приложение 5. Зависимость относительной влажности воздуха от температуры.....	50

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. Культивирование хлебопекарных дрожжей в струйно–инжекционном ферментаторе (КСИФ)

## 1.1. Общие положения

Газожидкостные и трехфазные сорбционные процессы (абсорбционные, хемосорбционные и биосорбционные) нашли широкое применение в современных технологиях различных отраслей промышленности. В качестве примера можно привести сахарную, пивобезалкогольную и микробиологическую, химическую и нефтехимическую отрасли [1].

Важную роль газожидкостные и трехфазные процессы играют в производстве продуктов питания. Так, в пивоваренной, безалкогольной и винодельческой промышленности от процессов брожения и сатурации, десорбции и дезодорации зависит качество пива, газированных напитков, изготовленных на основе воды, фруктовых соков или молочной сыворотки, а также качество шампанского и других шипучих вин. От эффективности проведения хемосорбционного процесса поглощения диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) из дымовых газов моноэтаноламином в большой степени зависит стоимость сухого льда.

Наиболее интенсивное развитие получили отрасли промышленности, в состав технологического процесса которых входят биосорбционные процессы. Интерес к биосорбционным процессам обусловлен в первую очередь значительным прогрессом в XX веке биотехнологии, включающей в себя, кроме микробиологического синтеза генную инженерию, культивирование клеток растений, животных и бактерий, клеточную и белковую инженерию. Это позволяет получить промышленным путем сотни биологически активных веществ, таких как ферменты, гормоны, антибиотики и других веществ, синтез которых традиционным химическим путем представлял бы в настоящее время неразрешимую задачу.

В основном промышленное применение биосорбционных процессов направлено на получение в больших объемах либо самой биомассы, либо продуктов микробиологического синтеза. Наиболее широкое применение биосорбционные процессы получили в производстве хлебопекарных и кормовых дрожжей, пива, лимонной и молочной кислот. Во всех этих случаях имеет место крупнотоннажное производство. Учитывая несомненную общность аэробного процесса культивирования одноклеточных микроорганизмов, осуществляемого с различными клетками и целями, остановимся на наиболее развитой – дрожжевой промышленности. Увеличение выпуска целевого продукта и, в частности,



хлебопекарных дрожжей при одновременном снижении их себестоимости и срока окупаемости капитальных затрат было и остается актуальной задачей любого дрожжевого предприятия.

**Цель данной лабораторной работы:** получение практических навыков при проведении процесса аэробного культивирования микроорганизма по заданному технологическому режиму.

Лабораторная работа включает в себя следующие этапы:

1. Подготовка исходного материала (биомассы) к засеву в ферментатор.
2. Подготовка питательной среды (субстрата) на весь цикл культивирования.
3. Загрузка ферментатора исходным материалом согласно заданному технологическому режиму.
4. Собственно, культивирование в заданном рабочем и технологическом режиме с почасовым контролем всех рабочих и технологических параметров.
5. Разгрузка и мойка ферментационной установки по окончании процесса культивирования.
6. Расчет всех требуемых параметров, характеризующих интенсивность и эффективность проведенного процесса культивирования, и построение всех графических зависимостей.

Перед началом проведения лабораторной работы студенты должны самостоятельно ознакомиться со схемой лабораторной установки, методами проведения эксперимента и методиками измерений всех требуемых рабочих и технологических параметров, пройти инструктаж по технике безопасности работы на данной установке с обязательной подписью в соответствующем журнале.

Инструктаж по технике безопасности работы на лабораторной установке проводит ведущий данное занятие преподаватель.

## **1.2. Описание лабораторной установки по культивированию дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* на мелассных питательных средах**

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 1. Установка состоит из теплообменника-аэратора (Т-А) (1), представляющего собой модель кожухотрубного струйно-инжекционного аппарата, емкости-накопителя Е-Н (2), центробежного насоса (3), жидкостного ротаметра (4), пеногасителя (5), счетчика газа (6), насосов дозаторов: для подачи сульфат аммония (7), диаммоний фосфата (8), мелассы (9). Для контроля за концентрацией растворенного кислорода в нижней части Е-Н был установлен датчик кислородомера (10).

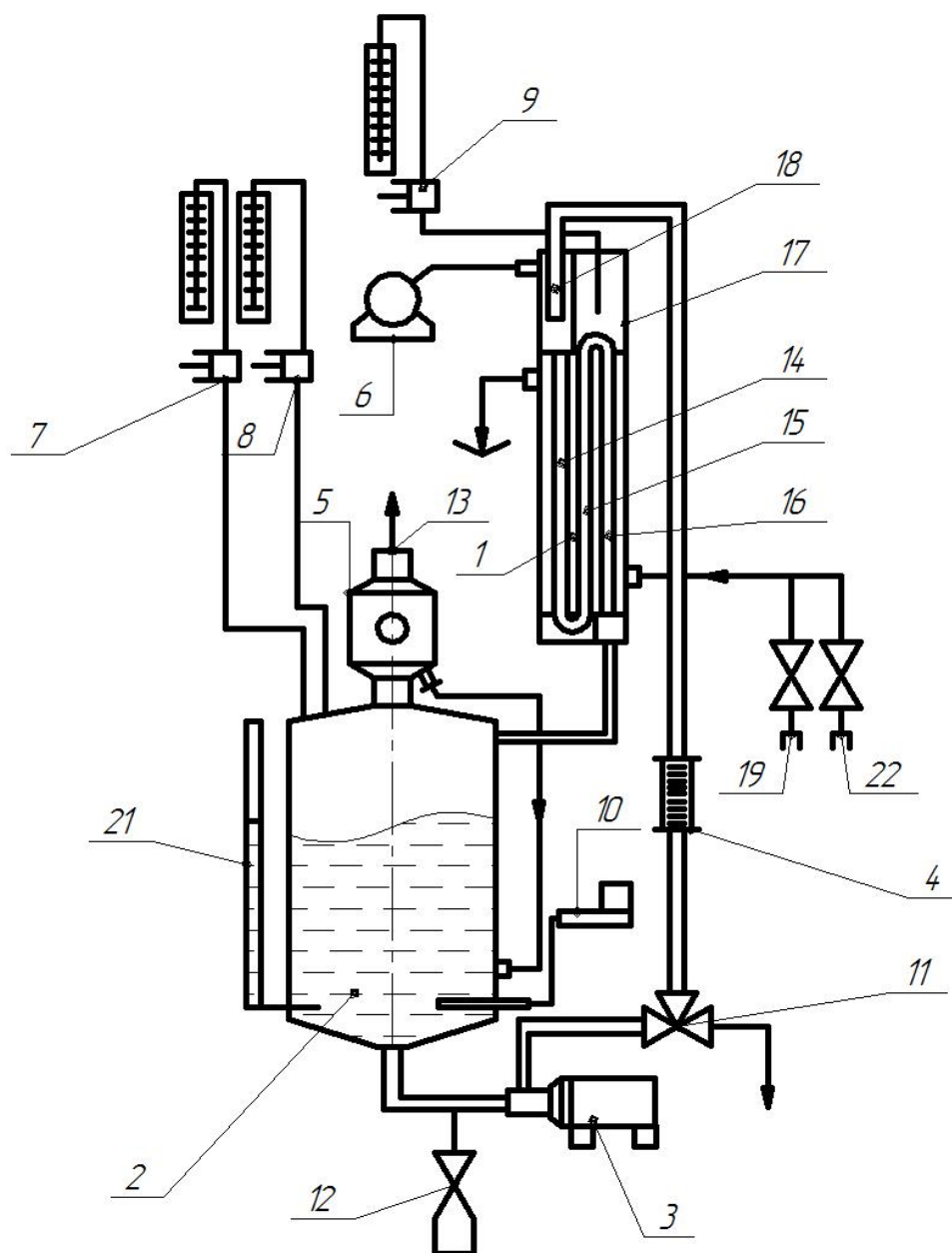


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки:

1 – теплообменник-аэратор; 2 – емкость-накопитель; 3 – центробежный насос; 4 – жидкостной ротаметр; 5 – пеногаситель; 6 – газовый счетчик ГСБ-400; 7–9 насосы дозаторы; 10 – кислородомер; 11– регулирующий вентиль; 12 – кран для отбора проб; 13 – патрубок для отвода отработанного воздуха; 14, 15, 16 – опускная, подъемная и сливная труба, соответственно; 17 – верхняя камера КСИА; 18 – сопло; 19, 20 – краны подачи горячего и холодного теплоносителя соответственно; 21 – уровнемер.

Регулирование расхода жидкости, циркулирующей через аппарат, осуществляется краном (11). Отбор проб культуральной жидкости для последующих анализов выполняется через специальный отвод и кран (12), установленные на всасывающем трубопроводе. Отвод отработанного воздуха происходит через патрубок (13) непосредственно в атмосферу.

Модель КСИА представляет собой трехтрубный аппарат, выполненный из нержавеющей стали. Диаметр опускных (14), подъемных (15) и сливных труб (16) одинаков и равен 27 мм. Длина труб  $L_{тр} = 1$  м. Конструкция верхней камеры (17) КСИА позволяет устанавливать сопла (18) как над опускными, так и над сливными трубами.

Подача предварительно подготовленного водного раствора мелассы производится непосредственно в верхнюю камеру КСИА, а водных растворов сульфат аммония и диаммоний фосфата в емкость-накопитель (2).

Охлаждение или подогрев культуральной среды в процессе эксперимента осуществляется непосредственно в КСИА путем подачи холодной (19) или горячей (20) воды в тепловую рубашку. Установка работает следующим образом: вода, водные растворы солей и мелассы, ростовые вещества вводятся согласно заданному технологическому режиму в емкость-накопитель (2) (технологический режим выдается ведущим преподавателем). Затем включают насос (3), и водный раствор субстрата через ротаметр (4) поступает к соплу (18), установленному в верхней крышке КСИА. Из сопла (18) жидкость вытекает в виде свободной струи и поступает в опускную трубу, и далее образовавшаяся газожидкостная смесь двигается по трубам КСИА (14-16) и поступает в Е-Н, где отработанный воздух отделяется от жидкости и удаляется из аппарата через пеногаситель (5) и патрубок (13). При движении через теплообменник-аэратор (1) жидкость нагревается или охлаждается в зависимости от требуемой температуры культивирования  $t_k$ . При достижении заданной  $t_k$  в Е-Н через пеногаситель (5) вводятся специально подготовленные к культивированию дрожжи, и устанавливается заданный расход жидкости через сопло (18), который контролируется ротаметром (4). Регулировка расхода жидкости через сопло (18) осуществляется вентилем (11). Культивирование ведется воздушно-приточным способом. Контроль за температурой осуществляется с помощью микротерморезисторов, установленных в различных точках экспериментальной установки:  $t_1$  – температура охлаждающей воды на входе в Т-А;  $t_2$  – на выходе из Т-А;  $t_3$  – температура культуральной жидкости на входе в Е-Н. Атмосферное давление воздуха определяется барометром. Расход воздуха  $Q_{г}$ , инжектируемого струями, измеряется объемным счетчиком газа (6). Для гашения пены применяется химический пеногаситель, который при нарастании уровня пены выше допустимого

вручную (каплями из мерной пипетки) вводится в Е-Н через патрубок пеногасителя (13). Количество пеногасителя, пошедшего на гашение пены, определяется по разности уровней в мерной пипетке. Контроль за величиной рН культуральной жидкости осуществляется рН-метром марки рН-637М при анализе проб. Уровень культуральной жидкости в Е-Н контролируется визуально с помощью мерной стеклянной трубки (21).

### 1.3. Методика проведения эксперимента по культивированию хлебопекарных дрожжей при высоких концентрациях

Культивирование хлебопекарных дрожжей ведется по технологическим режимам, разрабатываемым для каждого отдельного опыта. В качестве примера в таблице 1.1 представлен один из технологических режимов, предлагаемых для каждого опытного культивирования.

Таблица 1.1

Технологический режим культивирования хлебопекарных дрожжей

$\tau$ ч	$D$ г	$\alpha$	$X_k$ г/л	$\Delta D$ г	$B$ %	$M_{46}$ г	$V_{д/ф}$ мл	$V_{с/а}$ мл	$V_{мел}$ мл
0	750		31				200		
1	938	1,25	38	188	75	250	-	-	373
2	1172	1,25	45,8	234	80	293	50	83	437
3	1442	1,23	54	270	90	300	50	97	448
4	1730	1,2	62	288	95	303	50	100	452
5	2041	1,18	71	311	100	311	50	105	464
6	2368	1,16	80	327	100	327	50	110	488
7	2723	1,15	89	355	100	355	50	120	530
8	3104	1,14	98	381	100	381	50	130	569
9	3508	1,13	108	404	100	404	50	140	603
10	3964	1,13	119	456	100	456	50	150	681
11	4479	1,13	129	515	100	515	-	170	769
12	5017	1,12	140	538	100	538	-	180	803
13	5568	1,11	141	551	100	551	-	185	822

Посевным материалом служит чистая культура *Saccharomyces cerevisiae*, получаемая на "Комбинате пищевых продуктов". Источниками азотного и фосфорного питания служат сульфат аммония и диаммоний фосфат, которые подаются в ферментатор в виде 20 % водных растворов. Дефицит калия и магния в мелассе восполняется за счет внесения  $MgSO_4$  и  $KCl$  (если потребуется). В качестве стимулятора роста используется детиобиотин. Для регулирования рН культуральной жидкости используется либо серная кислота для понижения рН, либо водный раствор аммиака для повышения рН, растворы подаются вручную. Подача азотного и фосфорного питания осуществляется из расчета содержания в дрожжах 1,8 % азота и 0,6 %  $P_2O_5$  в расчете на дрожжи с массовой долей СВ 25 %. Подача углеводного питания рассчитывается всегда исходя из получения 100 % выхода (В) в расчете на мелассу с массовой долей сахара 46 %. При отклонении от заданного режима культивирования графики подачи мелассы и питательных солей должны корректироваться. В ходе процесса культивирования постоянно контролируются: температура культуральной жидкости  $t_k$  ( $^{\circ}C$ ), подача воздуха в аппарат  $Q_r$  ( $m^3/c$ ), подача жидкости в КСИА к соплам  $Q_{ж}$  ( $m^3/c$ ), подача мелассы  $Q_m$ , концентрация растворенного кислорода. Ежечасно, согласно выданному технологическому режиму, для контроля за процессом роста дрожжей отбираются пробы с целью определения концентрации биомассы  $X_k$  ( $кг/м^3$ ) и рН среды, а также для анализа за физиологическим состоянием клеток и наличием почкующихся и отпочковавшихся клеток.

Накопление дрожжей определяется следующим образом: после отбора пробы из аппарата в мерный стакан (объем пробы составляет 200 мл) отбирается и переносится в пробирку мерной пипеткой 10 мл культуральной жидкости, центрифугируется для отделения субстрата, промывается дистиллированной водой, вновь центрифугируется для отделения воды и далее переносится в предварительно высушенную и взвешенную бюксу. Затем проба высушивается в сушильном шкафу в течение 12 часов при  $t=105^{\circ}C$  и взвешивается. Единовременное количество проб для оценки концентрации биомассы составляет не менее трех. После взвешивания бюкс с пробой определяется вес абсолютно сухих дрожжей (АСД):

$$G_{АСД} = G_2 - G_1, \quad (1.1)$$

где  $G_1$  – вес бюксы без пробы, кг;  $G_2$  – вес бюксы с пробой, кг.

Полученные результаты усредняются. Для определения концентрации дрожжей с 25 % содержанием сухих веществ в клетке используется следующая формула,  $кг/м^3$ :

$$X = \frac{G_{\text{АСД}} \cdot 10^{-3} \cdot 100\%}{10 \cdot 10^{-6} \cdot 25\%}, \quad (1.2)$$

Количество биомассы в аппарате на момент взятия данной пробы оценивается по уравнению, кг:

$$D_{25} = X \cdot V_{\text{апп}}, \quad (1.3)$$

где  $V_{\text{апп}}$  – объем культуральной жидкости в аппарате, м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{апп}} = V_{\text{скл}} + V_{\text{м}} + V_{\text{с/а}} + V_{\text{д/ф}} + \Sigma V_{\text{др}} - V_{\text{пр}}, \quad (1.4)$$

где  $V_{\text{скл}}$  – заполнение аппарата на нулевой час (согласно технологическому режиму), м<sup>3</sup>;  $V_{\text{м}}$  – объем водного раствора мелассы, поданной в аппарат на данный час, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{с/а}}$  – объем водного раствора сульфата аммония, поданного в аппарат на данный час, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{д/ф}}$  – объем водного раствора диаммоний фосфата, поданного на данный час, м<sup>3</sup>;  $\Sigma V_{\text{др}}$  – объемы других жидкостей, поданных в течение часа (кислота, детиобиотин, пеногаситель и т.п.), м<sup>3</sup>;  $V_{\text{пр}}$  – объем отобранной предыдущей пробы, м<sup>3</sup>.

Прирост биомассы определяется по уравнению:

$$\Delta D = D_{\text{к}} - D_{\text{н}}, \quad (1.5)$$

где  $D_{\text{н}}$ ,  $D_{\text{к}}$  – количество биомассы в аппарате в начале и конце часового промежутка времени, кг.

Удельная скорость роста определяется по уравнению:

$$\mu = \ln \frac{D_{\text{к}}}{D_{\text{н}}}, \quad (1.6)$$

а реальный коэффициент часового прироста составляет

$$\alpha = \frac{D_{\text{к}}}{D_{\text{н}}}, \quad (1.7)$$

Выход биомассы с единицы мелассы равен

$$B = \frac{\Delta D \cdot 100\%}{M_{46}}, \quad (1.8)$$

где  $M_{46}$  – количество мелассы с 46 % содержанием сахара, кг:

$$M_{46} = \frac{V_m \cdot \rho_m \cdot C_{CB}}{CB}, \quad (1.9)$$

где  $CB$  – содержание сухих веществ в мелассе, % (по данным лаборатории завода);  $V_m$  – объем раствора мелассы, пошедшей на культивирование за заданный промежуток времени,  $m^3$ ;  $\rho_m$  – плотность раствора мелассы,  $kg/m^3$ ;  $C_{CB}$  – концентрация сухих веществ в растворе, %.

Температура культивирования во всех опытах поддерживается постоянной  $t = 30 \pm 0,2$  °С. рН среды в процессе культивирования поддерживается в пределах от 4,5 до 3, в случае выхода значения рН за указанные пределы в культуральную жидкость необходимо внести соответственно кислоту или щелочь и провести контрольный замер рН.

Данные контроля над процессом культивирования, результаты часовых измерений, а также все наблюдения и вносимые изменения в ходе процесса заносятся в рабочий журнал для последующего анализа (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Дата: \_\_\_\_\_

Технологический режим: № \_\_\_\_\_

Время эксперимента	$\tau$	$Q$	$V_{\Gamma}$	$\tau_{\Gamma}$	$Q_{\Gamma}$	$Q_{ж}$	$t_3$	$pH$	$G_1$	$G_2$	$\Delta G$	$V_{скл}$	$V_{мел}$	$V_{в/ф}$	$V_{с/а}$	$\Sigma V_{др}$
	ч	$m^3/c$	$m^3$	с	$m^3/c$	$m^3/c$	°С		кг	кг	кг	$m^3$	$m^3$	$m^3$	$m^3$	$m^3$

По результатам измерения концентрации биомассы, расхода воздуха  $Q_{\Gamma}$ , и жидкости  $Q_{\text{ж}}$  оцениваются основные параметры, характеризующие эффективность процесса культивирования в КСИФе, и некоторые гидродинамические и массообменные характеристики.

Продуктивность процесса ( $\Pi$ ) определяется по уравнению:

$$\Pi = \frac{D_{\text{к}} - D_{\text{н}}}{V_{\text{апп}} \cdot \tau} \quad (1.10)$$

Коэффициент утилизации кислорода,  $K_y$ , показывающий эффективность использования подаваемого кислорода в ферментатор:

$$K_y = \frac{M_{\text{п}O_2}}{M_{O_2}} 100\%, \quad (1.11)$$

где  $M_{\text{п}O_2}$  – количество кг  $O_2$ , потребляемого дрожжами за час;  $M_{O_2}$  – количество кг  $O_2$ , поданного в аппарат с воздухом за час.

Значения рассчитываются исходя из часовой потребности клеток в кислороде, кг  $O_2$ /ч:

$$M_{\text{п}O_2} = 0,2D_{\text{н}} + 0,28\Delta D. \quad (1.12)$$

Значения рассчитываются по уравнению, кг  $O_2$ /ч:

$$M_{O_2} = 0,21 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma} \cdot 3600, \quad (1.13)$$

где  $\rho_{\Gamma}$  – плотность воздуха при  $t = 20$  °С, кг/м<sup>3</sup>; 0,21 – доля содержания кислорода в воздухе;  $Q_{\Gamma}$  – расход воздуха, подаваемого в аппарат, м<sup>3</sup>/с.

Объемный коэффициент массоотдачи  $\beta_v$  оценивается по данным о потреблении кислорода дрожжами за час по уравнениям:

$$\beta_v = \frac{M_{\text{п}O_2}}{(C_{O_2}^* - C_{O_2}) 3600}, \quad (1.14)$$



где  $C_{O_2}^*$  – равновесная концентрация растворенного кислорода воздуха в субстрате, кг  $O_2/m^3$ ;  $C_{O_2}$  – рабочая концентрация растворенного кислорода в субстрате кг  $O_2/m^3$ .

Интенсивность аэрации культуральной жидкости по уравнению,  $m^3/(m^3ч)$ :

$$U = \frac{Q_{\Gamma}}{V_{\text{апп}}} \quad (1.15)$$

Время пребывания культуральной жидкости в Е-Н, с:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{апп}}}{Q_{\text{ж}}} \quad (1.16)$$

Результаты проведенных расчетов сводятся в таблицу расчетных данных (табл. 1.3) и анализируются.

Таблица 1.3

Время эксперимента	$\tau$ ч	$D$ г	$V_{\text{апп}}$ $m^3$	$\alpha$	$\mu$ $c^{-1}$	$M_{46}$ кг	$\Pi$ $\frac{кг}{m^3 \cdot ч}$	$K_y$ %	$M_{O_2}$ $\frac{кгO_2}{ч}$	$M_{\Pi O_2}$ $\frac{кгO_2}{ч}$	$\beta_V$ $c^{-1}$	$U$ $\frac{m^3}{(m^3 \cdot ч)}$	$\tau_{\text{пр}}$ с

По результатам расчетов строятся следующие графики зависимостей:

- график зависимости удельной скорости роста количества клеток во время эксперимента,  $\mu = f(\tau)$ ;
- график зависимости расхода инжестируемого газа во время эксперимента,  $Q_{\Gamma} = f(\tau)$ ;

- график зависимости объемного коэффициента массоотдачи кислорода из газовой фазы в культуральную жидкость,  $\beta_V = f(\tau)$ ;
- график изменения продуктивности аппарата во времени,  $\Pi = f(\tau)$ .

**Отчет должен содержать:**

- 1) задание;
- 2) схему установки;
- 3) отчетную таблицу;
- 4) необходимые расчеты;
- 5) выводы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. Исследование процесса сушки пивных дрожжей в псевдооживленном слое инертных тел

### 2.1. Общие положения

В последнее время в пищевой и микробиологической отраслях промышленности интенсивно внедряются сушилки с псевдооживленным слоем инертных носителей, которые используются для сушки, в частности, пивных дрожжей.

Способ сушки заключается в том, что суспензия распыляется в псевдооживленный слой инертных тел (в нашем случае гранул из фторопласта). Материал в виде тонкой пленки или отдельных капель распределяется по поверхности инертных тел. После удаления влаги сухие частицы продукта отделяются от поверхности инертных тел в результате их взаимного столкновения, а образовавшиеся частицы сухого материала уносятся из аппарата потоком отработанного теплоносителя и выделяются из него в циклонах. При таком способе сушки продукт не перегревается и во многом сохраняет свои полезные свойства.

Эффективность работы сушильной установки можно оценить основными параметрами:

1. Удельный расход сушильного агента (в килограммах сухого воздуха на килограмм испаренной влаги):

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0}, \quad (2.1)$$

где  $x_0$ ,  $x_2$  – влагосодержание сушильного агента на входе и выходе из сушильной установки соответственно (кг влаги на кг сухого воздуха);  $L$  – расход сухого воздуха, кг/с;  $W$  – производительность сушилки по испаренной влаге, кг/с.

2. Удельный расход теплоты (кДж/кг испаренной влаги):

$$q = \frac{Q}{W} = \frac{i_1 - i_0}{x_2 - x_0}, \quad (2.2)$$

где  $Q$  – расход теплоты на процесс сушки (кДж/кг испаренной влаги);  $i_0$ ,  $i_1$  – соответственно энтальпии сушильного агента на входе в калорифер и в сушильную камеру (кДж/кг сухого воздуха).

3. Влагодъем с 1 м<sup>3</sup> рабочего объема сушильной камеры (кг испаренной влаги с 1 м<sup>3</sup> сушильной камеры в час, кг/ м<sup>3</sup>·с):

$$A = \frac{W}{V}, \quad (2.3)$$

где  $V$  – объем цилиндрической части сушильной камеры, м<sup>3</sup>.

4. Удельная нагрузка на инертные тела, кг продукта/(кг инертных тел·час):

$$q = \frac{G_{\text{к}}}{M_{\text{ин}}}, \quad (2.4)$$

где  $G_{\text{к}}$  – производительность сушилки по исходному влажному материалу;  $M_{\text{ин}}$  – масса инертных тел в аппарате.

5. Удельный расход теплоты теоретической сушилки  $q_{\text{т}}$ , т.е. сушилки в которой вся теплота, отданная воздухом, идет на испарение влаги ( $i_{1\text{т}} = i_2$ ), где  $i_{1\text{т}}$  – начальное теплосодержание воздуха в теоретической сушилке:

$$q_{\text{т}} = \frac{i_2 - i_0}{x_2 - x_0}, \quad (2.5)$$

6. Тепловой КПД установки:

$$\eta = \frac{r}{q}, \quad (2.6)$$

где  $r$  – теплота парообразования при  $t_{\text{м}}$  (температура мокрого термометра), кДж/кг испаренной влаги.

**Цель работы:** ознакомление с устройством, работой сушильной установки с псевдоожиженным слоем инертных тел и определение основных характеристик процесса сушки.

## 2.2. Описание экспериментальной установки

Схема установки для изучения процесса сушки представлена на рисунке 2. Частицы инертного материала (гранулы фторопласта (4) в виде куба с размером ребра грани в среднем 4 мм) загружаются в сушильную камеру (3) из бункера (1) (для этого необходимо открыть кран (2)). Сушильная камера (3) представляет собой колонну квадратного сечения (0,1 × 0,1 м), в нижней части которой установлен щелевой газораспределитель (4). В верхней части камеры установлен воздушный сепаратор (5), который предотвращает унос инертных тел. Сушильная камера имеет смотровые окна (6) с подсветкой для визуального наблюдения за состоянием слоя.

Подача высушиваемого материала в аппарат осуществляется пневматической форсункой внешнего смешения (7). Пневматические форсунки позволяют регулировать дисперсность распыла изменением давления воздуха, подаваемого компрессором (8). Жидкий материал из бака (9), снабженного перемешивающим устройством, подается в форсунку объемным насосом (10), производительность которого можно регулировать.

Сушильный агент (воздух) подается из помещения роторной воздуходувкой (11) в электрический калорифер (12) и далее направляется в сушильную камеру (3). После сушильной камеры воздух поступает в циклон (13), где от него отделяются частицы высушиваемого продукта, которые собираются в сборнике (14).

Расход воздуха регулируют путем изменения числа оборотов электродвигателя постоянного тока (15). Для этой цели имеется пульт управления (16), с которого регулируется напряжение питания электродвигателя. Измеряют расход воздуха нормальной диафрагмой с подключенным к ней дифференциальным манометром (17).

Температуру воздуха на входе в сушильную камеру регулируют с пульта управления (18) изменением мощности, подводимой к электронагревателям калорифера. Температуру воздуха на входе в сушильную камеру определяют термопарой (19), на выходе – термопарой (20), которые подключены к электронному вольтметру В2-23.

Температуру и относительную влажность воздуха, поступающего в калорифер, определяют по показаниям психрометра, установленного в помещении (на пульте 18).

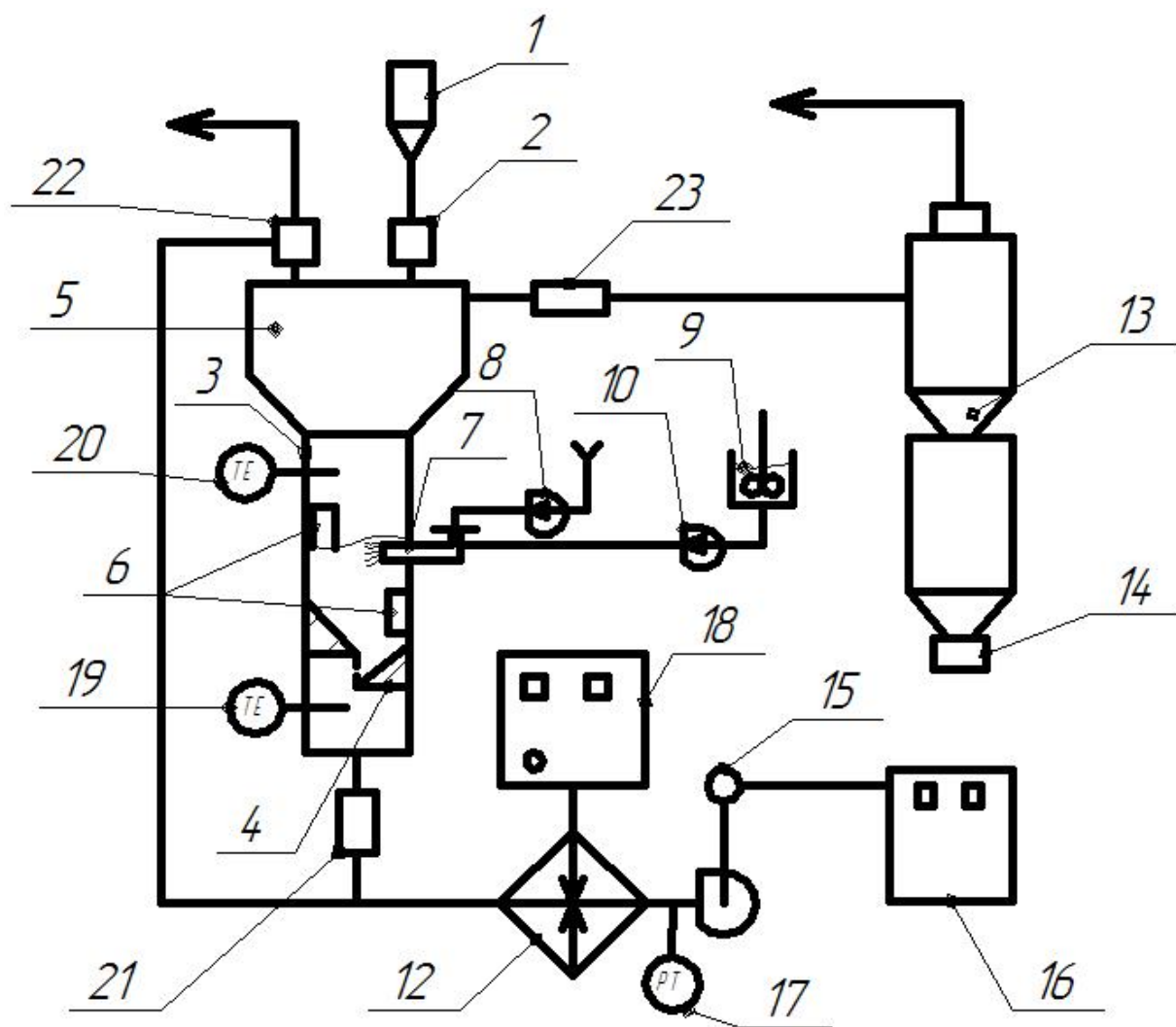


Рисунок 2. Схема установки для изучения процесса сушки в псевдооживленном слое инертных тел:

1 – бункер; 2 – кран; 3 – сушильная камера; 4 – газораспределитель; 5 – сепаратор; 6 – смотровые окна; 7 – пневматическая форсунка; 8 – компрессор; 9 – бак для исходного материала; 10 – насос; 11 – воздуходувка; 12 – калорифер; 13 – циклон-разгрузитель; 14 – сборник готового продукта; 15 – электродвигатель, 16 – пульт управления работой электродвигателя; 17 – диафрагма с дифференциальным манометром; 20 – термопары; 21, 22, 23 – краны

### 2.3. Методика проведения работы

Важно вначале ознакомиться с конструкцией установки и описанием ее работы и только после собеседования с преподавателем приступить к выполнению работы. Все работы выполняются только в присутствии преподавателя или лаборанта.

1. Включить вольтметр В2–23 и дать ему прогреться не менее 20 минут.
2. Приготовить материал, предназначенный для сушки. Взять в бюкс навеску дрожжей массой  $M_n$  для определения влажности и поставить в сушильный шкаф при температуре  $130^{\circ}\text{C}$  на 45 минут.
3. Определить массу инертного материала,  $M_{ин}$ .
4. Краны (21, 22, 23) установить в положение "Работа". Загрузить инертные тела в бункер (1).
5. Загрузить инертные тела в сушильную камеру. Для этой цели открыть кран (2). После окончания загрузки кран закрыть.
6. В бак (9) залить воду.
7. Кнопкой "Пуск" на пульте (16) включить воздухоподогреватель и, изменяя число оборотов электродвигателя с помощью ручки "Напряжение", по дифманометру установить заданный расход воздуха.
8. Кнопкой "Калорифер" "Вкл" на пульте (18) включить электрокалорифер, и, когда воздух на входе в сушильную камеру нагреется до температуры  $120\text{--}140^{\circ}\text{C}$ , включить тумблерами "Сеть" на корпусе аппарата компрессор (8) и насос (10), которые начинают подачу воды в камеру.
9. Как только вода начнет поступать в сушилку, температура воздуха на выходе из камеры резко понизится. Ручкой "Регулировка" на пульте (18) установить заданную температуру воздуха на выходе из камеры (должна быть постоянной во времени).
10. В бак (9) залить высушиваемый материал и тумблером "Сеть" на корпусе аппарата включить перемешивающее устройство (компрессор и насос продолжают работать). При этом температура на выходе несколько изменится, поэтому измерения следует начинать только через 3–5 минут.
11. Включить секундомер и начинать отсчет времени. Показания всех контрольно-измерительных приборов (17, 19, 20) записывать через каждые 3–4 минуты.
12. После того, как весь материал будет высушен, останавливают секундомер (окончание эксперимента), быстро заменяют сборник готового продукта, а в бак (9) вновь заливают воду (для промывки). Промывку ведут в течение 5–10 минут.

## 2.4. Обработка опытных данных и составление отчета

### Условия опыта:

- масса исходного материала (сухой порошок)  $M$ , кг;
- масса инертных тел в аппарате,  $M_{ин}$ , кг;
- продолжительность опыта,  $\tau$ , с;
- диаметр отверстия диафрагмы,  $d_0$ , м;
- влажность суспензии,  $U_n$ , %;
- влажность готового продукта,  $U_k$ , %;
- $t_1, t_2$  – температура сушильного агента на входе и на выходе, соответственно, °C;
- показания психрометра: сухой термометр  $t_0$ , °C.

### Порядок расчетов:

1. Определить влажность исходных дрожжей  $U_n$ , %:

$$U_n = \frac{M_n - M_k}{M_n} 100\% \quad , \quad (2.7)$$

где  $M_n, M_k$  – соответственно массы навески до и после сушки.

2. Рассчитать средние значения сушильного агента  $t_1$  и  $t_2$  и показания дифманометра  $\Delta h$  за время опыта (в дальнейшем в расчетах использовать именно эти значения).

3. Рассчитать массовый расход сушильного агента  $L$ , кг/с:

$$L' = \frac{\pi d_0^2}{4} \rho \alpha \sqrt{\frac{2\Delta h g}{\rho}} \quad , \quad (2.8)$$

$$\rho = 1,293 \frac{273}{(273 + t)} \quad , \quad (2.9)$$

где  $d_0$  – диаметр отверстия диафрагмы, м;  $\rho$  – плотность воздуха при  $t$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент расхода диафрагмы;  $\Delta h$  – показания дифманометра, мм вод.ст;  $g = 9,8$  – ускорение свободного падения, м/с.

4. Рассчитать производительность сушилки по исходному влажному материалу, кг/с:



$$G_H = \frac{M_H}{\tau} \quad , \quad (2.10)$$

5. Рассчитать производительность сушилки по испаренной влаге, кг/с:

$$W = G_H \frac{U_H - U_K}{100 - U_K} \quad , \quad (2.11)$$

6. Рассчитать производительность сушилки по сухому материалу, кг/с:

$$G_K = \frac{M_{\text{ц}}}{\tau} \quad , \quad (2.12)$$

где  $M_{\text{ц}}$  – масса высушенного продукта в циклоне, кг.

6.1. Нагрузка на инертные тела, кг продукта / (кг инертных тел·час):

$$q = \frac{G_H}{M_{\text{ин}}} \quad , \quad (2.13)$$

7. Влажесодержание воздуха (кг влаги / кг сухого воздуха), поступающего в сушилку:

$$x_0 = x_1 = 0,622 \frac{\varphi_0 \cdot P_{H_0}}{P_0 - \varphi_0 \cdot P_{H_0}} \quad , \quad (2.14)$$

отработанного:

$$x_2 = 0,622 \frac{\varphi_2 \cdot P_{H_2}}{P_2 - \varphi_2 \cdot P_{H_2}} \quad , \quad (2.15)$$

где  $P_{H_0}$  и  $P_{H_2}$  – давление насыщенного водяного пара соответственно при  $t_0$  и  $t_c$  (см. табл. 1 приложения), Н/м<sup>2</sup>;  $t_0$  – температура атмосферного воздуха;  $t_c$  – температура отработанного сушильного агента, измеренная

сухим термометром психрометра;  $P_0, P_2$  – барометрическое давление, Н/м<sup>2</sup> (в первом приближении можно считать, что  $P_0 \approx P_2$ );  $\varphi_0, \varphi_2$  – относительная влажность атмосферного воздуха и отработанного сушильного агента (определяется по показаниям сухого и мокрого термометров с использованием таблицы 2 приложения).

8. Удельный расход сухого воздуха по формуле (2.1).

9. Расход сухого воздуха (кг/с):

$$L = lW. \quad (2.16)$$

10. Удельный расход тепла на сушку по формуле (2.2), где теплосодержание сушильного агента определяется на входе в калорифер:

$$i_0 = (C_B + C_{II} \cdot x_0)t_0 + 2493x_0, \quad (2.17)$$

на выходе из калорифера (на входе в сушильную камеру):

$$i_1 = (C_B + C_{II} \cdot x_0)t_1 + 2493x_0, \quad (2.18)$$

где  $C_B = 1,01$  кДж/(кг К) – средняя удельная теплоемкость сухого воздуха;  
 $C_{II} = 1,97$  кДж/(кг К) – средняя удельная теплоемкость водяного пара.

11. Напряжение сушилки по испаряемой влаге – по формуле (2.3).

12. Коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{Q_{\text{пол}}}{F \Delta t}, \quad (2.19)$$

где  $F$  – площадь поверхности инерта, м<sup>2</sup>:

$$F = N_{\text{част}} f_1 = \frac{M_{\text{ин}}}{m_1} f. \quad (2.20)$$

При этом значения  $Q_{\text{пол}}$  и  $\Delta t_{\text{ср}}$  – по формуле:

$$Q_{\text{пол}} = Wq, \quad (2.21)$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(t_1 - \theta_1) - (t_2 - \theta_2)}{2,3 \lg \frac{t_1 - \theta_1}{t_2 - \theta_2}}, \quad (2.22)$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – соответственно температуры материала на входе в сушильную камеру и на выходе (замеряется в приемнике готового продукта).

13. Тепловой к.п.д. установки – по формуле (2.6).

**Отчет должен содержать**

- 1) задание;
- 2) схему установки со спецификацией;
- 3) отчетную таблицу;
- 4) необходимые расчеты.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. Определение коэффициента трения по длине при движении зерновой суспензии в трубопроводе**

### **3.1 Общие положения**

Промышленное производство продуктов при непосредственном участии микроорганизмов получило масштабное распространение в спиртовой, пивоваренной, химико-фармацевтической, топливной и других отраслях производства. Модернизация процессов и аппаратов этих производств является важнейшей научно-технической задачей, которая неизбежно связана с созданием новых современных производственных комплексов, оснащенных высокоэффективным технологическим оборудованием [2].

В процессе производства пива или этанола одной из важнейших технологических стадий является стадия водно-тепловой и ферментативной обработки зернового сырья (ВТФО). В процессе проведения этого технологического процесса происходит неоднократное перемещение водно-зерновых суспензий из заторного чана в заторный котел, а также разгрузка этих аппаратов, которая осуществляется путем транспортировки суспензий к фильтр-чану.

Оценка гидравлических сопротивлений, возникающих при движении водно-зерновой суспензии, представляет собой актуальную задачу, решение которой позволит более точно проводить инженерные расчеты при подборе технологического оборудования, работающего в проточном или циркуляционном режиме.

В процессе ВТФО водно-зерновая суспензия претерпевает значительные структурно-механические изменения, а именно перевод крахмала зерна из нативного (природного) состояния в водорастворимое. Такая трансформация крахмала обычно осуществляется под воздействием на него повышенных температур, амилолитических ферментов, а также при активном гидродинамическом воздействии жидкой фазы на зерновые частицы (гидродинамическая обработка).

Наличие твердых зерновых частиц в жидкой фазе не позволяет использовать классические уравнения для расчета гидравлических сопротивлений при движении однофазных ньютоновских сред в прямом виде.

В этой связи представляет интерес поиск закономерностей, позволяющих осуществлять гидравлические расчеты трубопроводов при движении по ним водно-зерновой суспензии.

Основной задачей гидродинамики при течении жидкости любой природы является установление зависимости между скоростью движения

частиц жидкости и движущей силой, благодаря которой происходит это движение. На практике это выражается в получении инженерных уравнений, связывающих потребный напор и объемный расход.

Гидравлические сопротивления движению суспензии зависят от геометрического профиля внутренней поверхности коммуникационных трубопроводов, качественного и количественного состава суспензии, а также от расхода суспензии. Обычно при расчете трубопровода его схема и требуемый расход суспензии известны, и требуется определить напор, который необходимо создать на входе суспензии в него. В этом случае большое влияние на гидравлические сопротивления оказывают физические свойства перекачиваемой суспензии, а именно ее вязкость и плотность.

**Цель работы:** экспериментальное определение коэффициента трения по длине в горизонтальном трубопроводе при движении водно-зерновой суспензии.

### 3.2. Теоретическое обоснование метода построения консистентных кривых

Оценка силы сопротивления движению суспензии, по каналам с твердыми стенками, вытекает из понятия касательного напряжения  $\tau$ , связанного с силой трения жидкости о твердую стенку  $F_{\text{тр}}$ , следующим соотношением:

$$\tau = \frac{F_{\text{тр}}}{S}, \quad (3.1)$$

где  $S$  – площадь поверхности трения,  $\text{м}^2$ .

Для ньютоновских изотермических жидкостей, имеющих постоянное значение коэффициента динамической вязкости, независимо от скорости движения потока, величина  $\tau$  описывается уравнением:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du_x}{dy}, \quad (3.2)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\frac{du_x}{dy}$  – изменение локальной скорости движения слоя жидкости, в направлении основного движения потока  $x$ , при изменении расстояния между двумя соседними слоями  $dy$ , в направлении перпендикулярном к направлению  $x$  или скорость сдвига,  $\dot{\gamma}^{-1}$ .

Для упрощения записи уравнения (3.2) градиент локальной скорости обычно обозначают  $\dot{\gamma}$ , и оно принимает вид:

$$\tau_{yx} = \mu \dot{\gamma} \quad . \quad (3.3)$$

Уравнение (3.3) дает прямо пропорциональную зависимость между величиной касательных напряжений и скоростью сдвига для ньютоновских жидкостей.

Для неньютоновских жидкостей, к которым относятся суспензии, такой зависимости не наблюдается.

Установлено, что при постоянстве температуры и состава водно-зерновой суспензии на основе ячменя они относятся к группе псевдопластичных жидкостей, т.к. значение коэффициента динамической вязкости уменьшается с увеличением градиента скорости. Было показано, что в этом случае течение суспензии можно описать простой функциональной зависимостью степенного вида:

$$\tau_{yx} = K \dot{\gamma}^n, \quad (3.4)$$

где  $K$  – показатель консистенции жидкости;  $n$  – индекс течения при всех исследованных температурах водно-зерновой суспензии  $n < 1$ .

Значения  $K$  и  $n$  обычно определяются экспериментальным путем при помощи вискозиметров подходящей конструкции. Наиболее подходящими для измерения коэффициентов динамической вязкости водно-зерновых суспензий являются ротационные вискозиметры.

Другим путем оценки касательных напряжений при движении неньютоновских жидкостей является построение консистентных кривых течения, получивших широкое распространение в инженерной практике.

Консистентная кривая представляет собой графическую зависимость потерь потенциальной энергии  $\Delta P$  потока от его средней скорости  $v_{ср}$ .

Связь между касательными напряжениями  $\tau$  и  $\Delta P$  можно установить из основного уравнения равномерного течения, согласно которому:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot i \cdot R , \quad (3.5)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $i$  – гидравлический уклон:

$$i = \frac{P_1 - P_2}{\rho g L} = \frac{\Delta P}{\rho g L} ;$$

$P_1$ ;  $P_2$  – абсолютное давление в двух сечениях трубопровода, расположенных на расстоянии  $L$  друг от друга;

$R$  – гидравлический радиус,  $R = \frac{D}{4}$ , м.

Преобразуем уравнение (3.5), раскрыв значения  $i$  и  $R$  и выразив из них перепад давления  $\Delta P$  на участке длиной  $L$  и геометрический диаметр трубопровода  $D$ . В результате получим:

$$\tau = \rho g \frac{P_1 - P_2}{\rho g L} \frac{D}{4} = \frac{\Delta P \cdot D}{4L} = P' . \quad (3.6)$$

Средняя скорость потока может быть найдена из уравнения объемного расхода:

$$v_{\text{ср}} = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi r^2} = \frac{4Q}{\pi D^2} . \quad (3.7)$$

Для того чтобы показать адекватность уравнения (3.3) уравнению консистентной кривой, необходимо, чтобы размерности в левой и правой частях обоих уравнений совпадали. Если течение жидкости равномерно и соответствует ламинарному режиму движения, а также реологические характеристики жидкости не зависят от времени, то функциональная связь между  $P'$  и  $V'$  не будет зависеть от диаметра трубы. Учитывая последнее замечание, рассмотрим правую часть уравнения (3.7) и разделим полученное уравнение на  $D/2$ , раскрыв значение  $Q$ . В результате получим значение параметра  $V'$  в следующем виде:

$$V' = \frac{4Q \cdot 2}{\pi D^2 \cdot D} = \frac{8 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot v_{\text{cp}}}{\pi \cdot D^2 \cdot D} = \frac{8 \cdot v_{\text{cp}}}{D} . \quad (3.8)$$

Графическая зависимость  $P' = f(V')$  называется консистентной кривой течения. На основании многочисленных экспериментов показали, что уравнение (3.4) можно аппроксимировать связь величин  $P'$  и  $V'$  степенной функциональной зависимостью:

$$P' = K' V'^{n'} , \quad (3.9)$$

которая, по смыслу, аналогична степенному реологическому уравнению (3.4).

В уравнении (3.9)  $K'$  – показатель консистенции,  $n'$  – показатель неньютоновского поведения, показатели определяются экспериментально. Между реологическими и консистентными коэффициентами существуют теоретические соотношения:

$$n = \frac{n'}{1 - \frac{1}{3n'+1} \cdot \frac{dn'}{d \ln P'}} , \quad (3.10)$$

$$K' = K \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n . \quad (3.11)$$

Уравнение консистентных кривых (3.9) более удобно для инженерных расчетов, чем степенное реологическое уравнение (3.4), т.к. это уравнение определяет непосредственно зависимость между перепадом давлений  $\Delta P$  и расходом жидкости как функцию диаметра трубопровода, если известны консистентные характеристики исследуемой жидкости. Недостатком метода построения консистентных кривых течения является невозможность получения данных по профилю скоростей, и не могут быть использованы в уравнениях движения жидкости, а также необходимость создания специальной экспериментальной установки и наличие измерительных устройств.



### 3.3. Описание экспериментальной установки

Эксперименты выполняются на специально созданной установке, схематическое изображение которой представлено на рисунке 3. Экспериментальная установка состоит из испытательного участка трубопровода (1), теплообменника «труба в трубе» (2), сборной емкости (3), циркуляционного насоса (4), электромагнитного расходомера (5), датчиков давления (6 и 7), водонагревательного котла (8), питательного насоса (9), объемного счетчика (10), запорной и регулирующей арматуры (11).

Испытательный участок представляет собой установленную строго горизонтально трубу с внутренним диаметром  $d_{\text{тр}}=38$  мм и длиной 3 м. На расстоянии 0,64 м от местного сопротивления на входе жидкости в этот участок установлен первый датчик давления (6) и ровно через 2 м – второй датчик (7). Расстояние от места установки второго датчика давления до местного сопротивления на выходе жидкости из испытательного трубопровода составляет 0,36 м. Все внешние поверхности трубопроводов, теплообменника (2) и емкости (3) изолированы от внешней среды. Установка позволяет осуществлять нагрев водно-зерновой суспензии до 80 °С и одновременно фиксировать изменение величины гидравлических сопротивлений, связанных с изменением ее структурно-механических свойств.

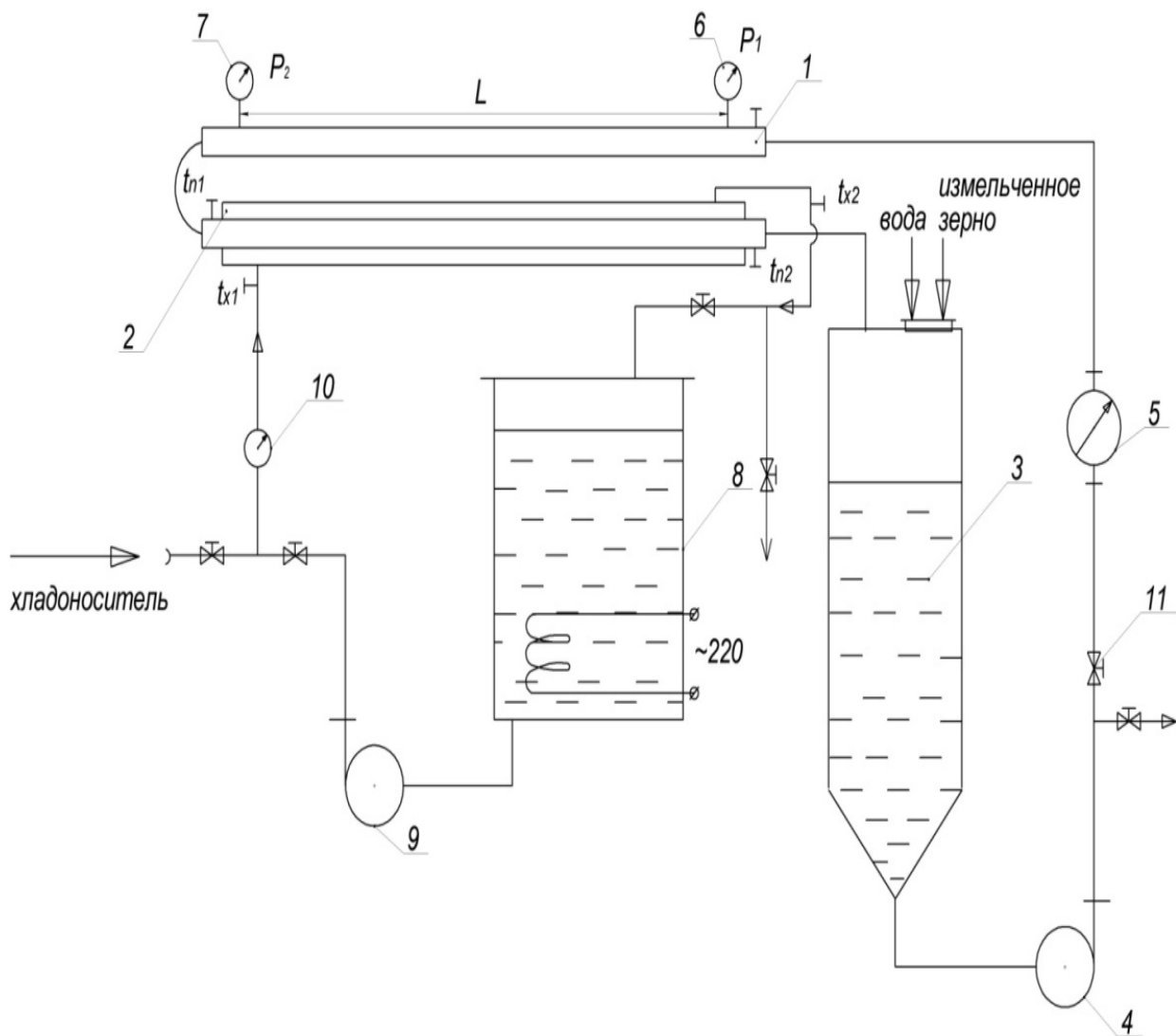


Рисунок 3. Схема экспериментальной установки для построения  
 консистентных кривых течения водно-зерновой суспензии,  
 приготовленной на основе ячменя:

1 – горизонтальная труба (исследуемый участок); 2 – теплообменник «труба в трубе»; 3 – цилиндрикоконическая емкость; 4 – циркуляционный насос; 5 – электромагнитный расходомер; 6, 7 – датчики давления; 8 – котел; 9 – насос подачи теплоносителя; 10 – объемный счетчик тепло- или хладоносителя;  $t_{П1}$ ;  $t_{П2}$ ;  $t_{x1}$ ;  $t_{x2}$  – датчики температуры

### 3.4. Подготовка зернового материала к созданию суспензий

Для проведения экспериментов по определению гидравлических сопротивлений при движении суспензии заданного гидромодуля необходимо подготовить зерновой материал в достаточном количестве и заданном гранулометрическом составе.

Исходное зерно (ячмень или солод) измельчается на ножевой дробилке РМ-120 с установленной разгрузочной решеткой 1 мм. При прохождении измельченного зерна через эту решетку получают частицы с диаметром меньше 1 мм.

Количество измельченного материала, необходимое для проведения эксперимента, зависит от гидромодуля суспензии (значение гидромодуля устанавливает преподаватель) и количества воды, необходимого для нормальной работы экспериментальной установки.

Минимальное объемное количество воды, обеспечивающее устойчивую работу насоса, 25 литров или 0,025 м<sup>3</sup>. Под гидромодулем суспензии ( $\Gamma$ ) понимается отношение массы измельченного зернового материала ( $m_з$ ) к массе воды ( $m_в$ ), которое определяется как:

$$\Gamma = \frac{m_з}{m_в} . \quad (3.12)$$

Задаваясь массой воды и зная заданный гидромодуль, можно определить количество зерна, необходимое для создания заданного гидромодуля.

Гидромодуль, кг. зерна/ кг. воды	Концентрация кг. зерна/кг. смеси
1:6	0,142
1:4	0,2
1:3,5	0,222
1:3	0,25
1:2,5	0,286

### 3.5. Методика поведения экспериментов

При проведении гидродинамических испытаний установка работает следующим образом: тщательно отмеренное количество воды, заливается в емкость (1), затем запускается насос (4), и вода начинает циркулировать через расходомер (5), исследуемый гидродинамический участок (1), теплообменник (2) и емкость (3). На этом этапе проверяется работа всех измерительных устройств, снимаются показания датчиков давления для определения гидравлических потерь энергии на чистой воде. После этого начинается подача измельченного зернового материала в требуемом количестве. По окончании загрузки зернового материала в емкость (1) по расходомеру (5) устанавливается первое значение расхода суспензии, и при этом расходе осуществляется в течение 3 минут его циркуляция через установку. Это делается с целью более равномерного распределения частиц по всему объему воды и смачивания их водой. Затем измеряется температура суспензии, и начинается непосредственно измерение давления в двух сечениях с помощью датчиков (6 и 7).

Установка заданной температуры суспензии производится следующим образом:

1. Предварительно заполненный водой котел (8) подключается к электропитанию на нагреватели.

2. Включается насос подачи теплоносителя в межтрубное пространство теплообменника (2).

3. Контроль за температурой суспензии производится при помощи датчиков температуры ( $t_{п1}$  и  $t_{п2}$ ).

4. По достижении требуемой температуры эксперимента отключается подача электроэнергии на нагреватели, при этом циркуляция теплоносителя продолжается.

С этого момента при установленном постоянном расходе фиксируются объемный расход жидкости и показания датчиков давления (6 и 7), а также датчиков температуры ( $t_{п1}$  и  $t_{п2}$ ).

После окончания определения вышеперечисленных параметров расход суспензии изменяется, и проводятся те же самые измерения. Изменение расхода суспензии желательно проводить с равным интервалом и по возможности таким образом, чтобы получить примерно 8–10 значений расходов суспензии.

Полученные данные заносятся в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Результаты измерений гидравлических сопротивлений при движении водно-зерновой суспензии в исследуемом участке трубопровода длиной 2 м. при температуре \_\_\_\_\_°С, гидромодуль \_\_\_\_\_...

№ п/п	$Q \cdot 10^{-5}$ м <sup>3</sup> /с	$v$ , м/с	$P_1$ кПа	$P_2$ кПа	$\Delta P$ , Па

### 3.6. Методика обработки результатов экспериментов

По окончании эксперимента проводится обработка полученных данных. Для этого вычисляют значения перепада давления на испытуемом участке  $\Delta P$ , полученные при помощи датчиков давления, Па:

$$\Delta P = P_1 - P_2. \quad (3.12)$$

Затем вычисляют значения средней скорости суспензионного потока  $v$ , м/с:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d_{\text{тр}}^2}. \quad (3.13)$$

Далее рассчитывают значения критерия Рейнольдса по уравнению:

$$\text{Re}_c = \frac{v^{2-n} \cdot d_{\text{тр}}^n \cdot \rho}{\frac{K}{8} \left[ \frac{6n+2}{n} \right]^n}, \quad (3.14)$$

где  $K$  – показатель консистенции жидкости;  $n$  – индекс течения.

Значения  $K$  и  $n$  выбираются из данных, полученных при реологических исследованиях для данного гидромодуля и данной температуры, приведенных в приложении 1.

Значения плотности суспензии, в зависимости от гидромодуля и температуры, приведены в приложении 2.

Имея значения  $\Delta P$  и  $v$ , рассчитывают значения коэффициента трения  $\lambda$  на исследуемом участке, используя уравнение Дарси–Вейсбаха:

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = \lambda \frac{L}{d_{\text{тр}}} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (3.15)$$

откуда:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta P \cdot d_{\text{тр}}}{v^2 \cdot \rho \cdot L}. \quad (3.16)$$

Для построения консистентных кривых течения по уравнениям (3.6) и (3.8) рассчитываются параметры  $P'$  и  $V'$ .

Результаты расчетов заносятся в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

Результаты расчетов параметров гидравлических сопротивлений по длине трубопровода и консистентных кривых при движении водно-зерновой суспензии на исследуемом участке трубопровода длиной 2 м при температуре = \_\_\_\_\_ °С, гидромодуль \_\_\_\_\_

№ п/п	$\rho$	$\mu$	$K$	$n$	$Re_c$	$\Delta P$	$\lambda$	$P'$	$V'$

Значения плотности и вязкости ячменных и солодовых суспензий для гидромодулей в диапазоне даны в приложениях 1 и 2.

По окончании расчетов всех требуемых параметров необходимо построить следующие графические и математические зависимости:

1. Изменение коэффициента трения по длине в зависимости от изменения коэффициента Рейнольдса,  $\lambda = f(Re_c)$ .

2. Построить консистентные кривые,  $P' = f(V')$ .

**Отчет должен содержать:**

- 1) задание;
- 2) схему установки;
- 3) отчетную таблицу;
- 4) необходимые расчеты.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. Экспериментальные исследования по уносу газовой фазы свободными суспензионными струями**

### **4.1 Общие положения**

Создание новых конструкций технологических аппаратов, реализующих на той или иной стадии технологического процесса трансформацию исходного сырья в готовый (целевой продукт), является одной из важнейших задач, стоящих перед исследователями и конструкторами, работающими в области процессов и аппаратов пищевых и биотехнологических производств. Одним из таких аппаратов является конструкция кожухотрубного струйно-инжекционного аппарата (КСИА), которая, в силу своей универсальности, может найти применение в различных отраслях пищевой промышленности. Сотрудниками Университета ИТМО были апробированы ряд конструкций КСИА применительно к промышленным технологическим процессам производства [2]:

- газированных напитков на основе воды и молочной сыворотки (сатурация напитков);
- хлебопекарных дрожжей (культивирование биомассы);
- пива (на стадиях культивирования биомассы и сбраживания сусле);
- этанола (на стадиях проведения водно-тепловой обработки зернового сырья, осахаривания и сбраживания);
- олифы (на стадиях окислирования растительного масла).

В настоящее время ведутся испытания КСИА в качестве универсального аппарата, предназначенного для замены им традиционных конструкций заторных чанов и заторных котлов, в которых осуществляется один из главных процессов в технологии пивоварения – процесс водно-тепловой обработки измельченного солода (процесс затириания).

Процесс затириания – это процесс расщепления полисахаридов крахмала в декстрины, мальтозу и глюкозу, которые в дальнейшем будут использованы пивными дрожжами в качестве питательных веществ. При проведении процесса затириания измельченные частицы сухого солода смешиваются с водой, растворимые компоненты зерна переходят в воду и становятся основными компонентами экстракта.

На полноценность проведения процесса затириания влияет температура затора, длительность и интенсивность его проведения, а также наличие разжижающих ферментов.



Однако, не смотря на очевидные преимущества КСИА, перекачивание образующейся трехфазной среды (смеси суспензии и газовой среды) и движение ее по трубам КСИА практически не изучено.

В этой связи исследование процесса образования трехфазной смеси в опускной трубе КСИА представляет большой научный интерес и является целью данной лабораторной работы.

#### **4.2 Описание экспериментальной установки по исследованию уноса газа свободными суспензионными струями**

Экспериментальное изучение уноса газа, свободной, суспензионной струей, вытекающей из цилиндрического сопла, установленного соосно над вертикальной опускной трубой, выполняется на экспериментальной установке, представленной на рисунке 4.

Установка состоит из трехтрубной модели струйно-инжекционного аппарата (СИА) I, емкости-накопителя (Е-Н) II, циркуляционного насоса III. Модель струйно-инжекционного аппарата I представляет собой вертикальный кожухотрубный теплообменник, без теплообменной рубашки, и выполнена из прозрачных материалов для возможности визуальных наблюдений за гидродинамической обстановкой в трубах аппарата.

Аппарат состоит из вертикальных опускной (1), подъемной (2) и сливной (3) труб, соединенных верхней (4) и нижней (6) трубными решетками. К нижней трубной решетке через резиновую прокладку болтами прикрепляется днище аппарата (21) с переходным каналом (11) и сливным отверстием, равным внутреннему диаметру труб 0,036 м. Площадь проходного сечения канала (11) равняется площади проходного сечения труб. Над верхней трубной решеткой (4) размещена верхняя газовая камера, образованная прозрачными стенками, верхней трубной решеткой (4) и верхней крышкой (5). Верхняя газовая камера разделена перегородкой (7) на две части: приемную камеру (9) и верхнюю циркуляционную камеру (10). Трубы (1, 2 и 3) с внутренним диаметром 0,036 м и длиной 0,8 м изготовлены из стекла, соединительные фланцы и стенки верхней газовой камеры аппарата из оргстекла.

В приемной камере (9) вертикально и соосно опускной трубе установлено сопло (8). Установка исследуемого сопла (8) выполнен таким образом, что нижний его срез во всех экспериментах находится на расстоянии 100 мм от плоскости верхней поверхности фланца (4). Сопла (8) имеют возможность быстрой замены путем выкручивания их из резьбового отверстия, расположенного в верхней крышке (5).

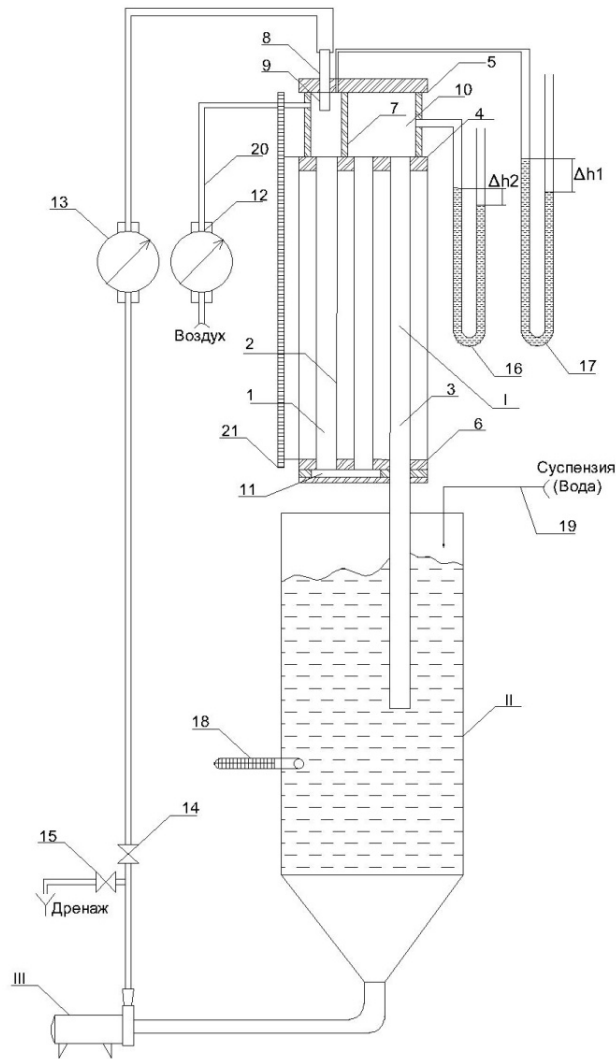


Рисунок 4. Схематическое изображение экспериментальной установки по исследованию гидродинамики:

I – модель струйно-инжекционного аппарата; II – емкость-накопитель; III – циркуляционный насос; 1 – опускная труба, 2 – подъемная труба; 3 – сливная труба; 4 – верхняя трубная решетка; 5 – верхняя крышка; 6 – нижняя трубная решетка; 7 – перегородка; 8 – съемное сопло; 9 – приемная камера; 10 – верхняя циркуляционная камера; 11 – переходной канал; 12 – жидкостной расходомер; 13 – газовый счетчик; 14 – регулирующий вентиль, 15 – сливной кран; 16, 17 – дифференциальные жидкостные манометры; 18 – термометр; 19 – линия подачи суспензии; 20 – воздушная магистраль

Кроме этого, приемная камера (9) снабжена штуцерами для подсоединения трубопроводов подачи газовой фазы и дифференциального водяного манометра (17). Циркуляционная камера (10) имеет штуцер для подсоединения дифференциального водяного манометра (16). Сливная труба (3) имеет продолжение в виде удлиненной ее части и заглубленной в рабочий объем емкости накопителя II на расстояние 1 м.

Емкость-накопитель II представляет собой выполненную из нержавеющей стали вертикальную цилиндрико-коническую емкость с диаметром цилиндрической части 0,2 м и высотой 1 м. В конической части находится патрубок для крепления циркуляционного трубопровода с насосом III, а также штуцер для закрепления термометра (18), установленный на боковой стенке Е-Н.

Установка снабжена жидкостным электромагнитным расходомером (12) и газовым счетчиком (13) марки ГСБ-400. Жидкостная циркуляционная линия выполнена из нержавеющей труб диаметром 32 мм. Газовая линия для подачи воздуха в аппарат выполнена из армированных шлангов высокого давления. На циркуляционной жидкостной линии установлен кран (11), позволяющий регулировать расход жидкости через аппарат. Кроме того, ниже крана (14) на циркуляционной жидкостной линии установлен отвод с краном (15) для удаления отработанной суспензии из установки. Подача свежеприготовленной суспензии и добавление воды осуществляются вручную через верх Е-Н – условная линия подачи (19). Аналогично подается вода для проведения мойки аппарата.

Установка работает следующим образом. В предварительно промытый аппарат подается тщательно приготовленный объем суспензии заданного гидромодуля. Затем включается насос III, и производится заполнение циркуляционного жидкостного трубопровода и модели СИА исследуемой суспензией при не полностью открытом кране (14). Затем полностью открывается кран (14), и фиксируется расход суспензии электромагнитным расходомером (12). Суспензия под напором, создаваемым насосом III, вытекает из сопла (8) в виде свободной жидкостной струи, инжектирует окружающий ее воздух и поступает в опускную трубу (1). Далее образовавшаяся газо-суспензионная смесь двигается в виде нисходящего потока к нижнему концу опускной трубы (1), перетекает через переходной канал (11) и поступает в подъемную трубу (2). В подъемной трубе (2) газо-суспензионная смесь двигается восходящим потоком и поступает в верхнюю циркуляционную камеру (10), из которой сливается по сливной трубе (3) в Е-Н.

Поток воздуха поступает в приемную камеру (9) через газовый счетчик (13) по газовой коммуникации (20) за счет разности между

атмосферным давлением и абсолютным давлением  $P_1$  в приемной камере (9), возникающим в результате уноса газовой фазы свободной суспензионной струей из приемной камеры (9) в трубу (1).

### 4.3 Методика определения уноса газа свободными суспензионными струями

Эксперименты по изучению уноса газа свободными суспензионными струями выполняются согласно следующей методике. Предварительно устанавливается сопло заданного диаметра проходного сечения. Подготовленные к исследованию массы измельченного солода и воды тщательно взвешиваются, смешиваются в предварительно оттарированной емкости. Полученная солодовая суспензия заданного гидромодуля переносится в емкость накопитель II (рисунок 4) вручную. После внесения заданного объема суспензии включается насос III, суспензия заполняет установку и циркулирует в течение 3 минут. Затем приступают, собственно, к исследованию:

- измеряют расход суспензии  $Q_C$  с помощью электромагнитного расходомера (12);
- измеряют расход воздуха  $Q_T$ , уносимого свободной суспензионной струей, при помощи барабанного газового счетчика ГСБ-400;
- измеряют давление в камерах (9 и 10) с помощью дифференциальных жидкостных манометров (16 и 17);
- измеряют температуру суспензии с помощью спиртового термометра с ценой деления  $0,5^\circ\text{C}$ ;
- измеряют уровень суспензии в опускной трубе (1) при помощи миллиметровой линейки;
- наблюдают за изменением структуры потоков в трубах.

Исследование начинают с максимального расхода суспензии. После снятия всех выше перечисленных измерений расход жидкости уменьшают путем прикрытия крана (14) и повторяют весь комплекс измерений, представленный выше. Затем меняется гидромодуль суспензии, и цикл измерений проводится повторно по вышеописанной последовательности.

Из данных измерений рассчитывают расход воздуха через аппарат по уравнению:

$$Q_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma}}{t}, \quad (4.1)$$

где  $V_{\Gamma}$  – объем воздуха, прошедший через счетчик газа за время  $t$ .

Зная  $Q_{\Gamma}$ , определяют приведенную скорость газа в трубах по уравнению:

$$w_{\Gamma} = \frac{Q_{\Gamma}}{S_{\text{тр}}} = \frac{4 \cdot Q_{\Gamma}}{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2}. \quad (4.2)$$

Из данных по измерению  $Q_{\text{с}}$  рассчитывают скорость истечения суспензии из сопла  $v_0$  по уравнению:

$$v_0 = \frac{Q_{\text{с}}}{S_0} = \frac{4 \cdot Q_{\text{с}}}{\pi \cdot d_0^2}, \quad (4.3)$$

и приведенную скорость суспензии в трубах по уравнению:

$$w_{\text{с}} = \frac{Q_{\text{с}}}{S_{\text{тр}}} = \frac{4 \cdot Q_{\text{с}}}{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2}. \quad (4.4)$$

Величина уровня газо-суспензионной смеси в опускной трубе  $H_{\text{с}1}$  измеряется визуально с помощью миллиметровой линейки (21). Зная значение  $H_{\text{с}1}$ , учитывая фиксированное расположение сопла (8) и толщину фланца (4), можно рассчитать длину свободной суспензионной струи:

$$L_{\text{с}} = H_{\Gamma} - H_{\text{с}1}, \quad (4.5)$$

где  $H_{\Gamma}$  – расстояние от верхней поверхности фланца (6) до среза сопла (8), равное 0,915 м.

Для обработки опытных данных необходимо связать отраслевое понятие «гидромодуль» с физическим понятием «концентрация» твердой фазы (измельченный солод) в воде. Пересчет величины гидромодуля в единицы концентрации твердой фазы в водном растворе производится с

помощью таблицы, приведенной в лабораторной работе 3. Полученные данные заносятся в таблицу измеренных величин, представленную ниже.

Таблица 4.1

Результаты измерений уноса газа свободной струей суспензии из сопла  $d_o = \dots$  мм, при температуре =  $\dots$  °C, гидромодуль суспензии.

№ п/п	$Q_{ж} \cdot 10^5$	$V_{Г}$	$t$	$H_c$	$L_c$
	м <sup>3</sup> /с	м <sup>3</sup>	с	м	м

Затем полученные в результате проведения серии опытов данные обрабатываются по вышеприведенным уравнениям (4.2 ÷ 4.4) и заносятся в таблицу расчетных величин, табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты обработки экспериментальных данных по уносу газа свободной струей суспензии из сопла  $d_o = \dots$  мм, при температуре =  $\dots$  °C, гидромодуль суспензии.....

№ п/п	$Q_c \cdot 10^5$	$Q_{Г} \cdot 10^5$	$i$	$w_c$	$w_{Г}$
	м <sup>3</sup> /с	м <sup>3</sup> /с	-	м/с	м/с

После проведения всех необходимых расчетов строят следующие графики зависимостей:

- графические зависимости  $Q_{Г} = f(Q_c, d_o)$  для каждого исследованного гидромодуля при постоянной температуре суспензии;

- производят математическую обработку зависимости инжектирующей способности струи  $i$  от  $Q_c$  для различных диаметров сопел и для различных гидромодулей;
- производят математическую обработку результатов эксперимента с целью получения обобщенной зависимости  $Q_\Gamma = f(Q_c, d_o, \Gamma)$ .

**Отчет должен содержать:**

- 1) задание;
- 2) схему установки;
- 3) отчетную таблицу;
- 4) необходимые расчеты и графики.

## Список использованной литературы

1. Новоселов А.Г. Интенсификация массообмена между газом и жидкостью и разработка высокоэффективных аппаратов для пищевой и микробиологической промышленности.- Дисс. докт. техн. наук, СПб.: СПбГНиПТ, 2002. – 265с.
2. Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н., Малахов Ю.Л., Чеботарь А.В. Рео- и гидродинамика зерновых суспензий. Научное обоснование выбора метода исследований и разработка экспериментального стенда // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств - 2017. - № 1(31). - С. 42-51.



## Приложения

### Приложение 1. Значения плотности водно-зерновых суспензий на основе ячменя $\rho_c$ в зависимости от температуры и гидромодуля, кг/м<sup>3</sup>

$T, ^\circ\text{C}$	Г1:2.5,	Г1:3,	Г1:3.5,	Г1:4,
30	1095,9	1090,3	1072,1	1058,2
40	1088,7	1082,5	1063,8	1056,8
50	1078,2	1076,6	1059,8	1048,3
60	1076,9	1070,6	1052,1	1041,7
70	1066,7	1062,9	1042,2	1031,9
80	1049,5	1049,1	1028,8	1026
90	1032,1	1023,7	1004,7	1005

**Приложение 2. Значения вязкости водно-зерновых суспензий на основе ячменя  $\mu$  в зависимости от температуры  $T$  и гидромодуля**

Суспензия	I-ая зона	II-ая зона	$K_1$	$K_2$
Гидромодуль 1:4	$\mu_I = \frac{K_1}{\dot{\gamma}^{0,98} \cdot T^{1,7}}$	$\mu_{II} = \frac{K_2 \cdot T^{8,4}}{\dot{\gamma}^{0,85}}$	5479	$5,39 \cdot 10^{-15}$
Гидромодуль 1:3,5	$\mu_I = \frac{K_1}{\dot{\gamma}^{0,932} \cdot T^{1,45}}$	$\mu_{II} = \frac{K_2 \cdot T^{8,54}}{\dot{\gamma}^{0,78}}$	5200	$5,24 \cdot 10^{-15}$
Гидромодуль 1:3	$\mu_I = \frac{K_1}{\dot{\gamma}^{0,875} \cdot T^{1,36}}$	$\mu_{II} = \frac{K_2 \cdot T^{8,89}}{\dot{\gamma}^{0,685}}$	3776	$1,45 \cdot 10^{-15}$
Гидромодуль 1:2,5	$\mu_I = \frac{K_1}{\dot{\gamma}^{0,675} \cdot T^{0,92}}$	$\mu_{II} = \frac{K_2 \cdot T^{8,75}}{\dot{\gamma}^{0,48}}$	685,6	$4,19 \cdot 10^{-15}$

### Приложение 3. ОТЧЕТНАЯ ТАБЛИЦА

№	Время τ, с	Показания диф. манометра , Δh, мм. вод.ст.	Объем жидкости в воронке, м <sup>3</sup>	Объемный расход сушильно- го агента, м <sup>3</sup> /с	Влажность материала, %		Температура сушильного агента		Температу ра материала		Показания термометров психрометра			
					Начальная , U <sub>н</sub>	Конечная U <sub>к</sub>	на входе, t <sub>1</sub>	на выходе, t <sub>2</sub>	жидкого, θ <sub>1</sub>	высушенного, θ <sub>2</sub>	атмосфер- ный воздух		отработан- ный сушильный агент	
											сухого, t <sub>0</sub>	мокрого, t <sub>0</sub> <sup>м</sup>	сухого, t <sub>c</sub>	мокрого, t <sub>м</sub>
							Номера термометров							
10	11	14	15											
СРЕДНЕЕ														

**Приложение 4. Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от давления**

Давление (абсолютное), кгс/см <sup>2</sup>	Температура, °С	Удельный объем, м <sup>3</sup> /кг	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная энтальпия жидкости $i'$ , кДж/кг	Удельная энтальпия пара, кДж/кг	Удельная теплота парообразования $r$ , кДж/кг
0,01	6,6	131,60	0,00760	27,7	2506	2478
0,015	12,7	89,64	0,01116	53,2	2518	2465
0,02	18,1	68,27	0,01465	71,6	2526	2455
0,025	20,7	55,28	0,01809	86,7	2533	2447
0,03	23,7	46,53	0,02149	99,3	2539	2440
0,04	28,6	35,46	0,02820	119,8	2548	2429
0,05	32,5	28,73	0,03481	136,2	2556	2420
0,06	35,8	24,19	0,04133	150,0	2562	2413
0,08	41,1	18,45	0,05420	172,2	2573	2400
0,10	45,4	14,96	0,06686	190,2	2581	2390
0,12	49,0	12,60	0,07937	205,3	2588	2382
0,15	53,6	10,22	0,09789	224,6	2596	2372
0,20	59,7	7,977	0,1283	250,1	2607	2358
0,30	68,7	5,331	0,1876	287,9	2620	2336
0,40	75,4	4,072	0,2456	315,9	2632	2320
0,50	80,9	3,304	0,3027	339,0	2642	2307
0,60	85,5	2,785	0,3590	358,2	2650	2296
0,70	89,3	2,411	0,4147	375,0	2657	2286
0,80	93,0	2,128	0,4699	389,7	2663	2278
0,90	96,2	1,906	0,5246	403,1	2668	2270
1,0	99,1	1,727	0,5790	415,2	2667	2264

**Приложение 5. Зависимость относительной влажности воздуха от температуры**

Температура воздуха, °С	Психометрическая разность ( $t - t^M$ ), °С										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Относительная влажность, %										
10	88	76	65	54	44	34	24	14	5	–	
11	88	77	66	56	46	36	26	17	8	–	
12	89	78	68	57	48	38	29	20	11	–	
13	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6	
14	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9	
15	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12	
16	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15	
17	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17	
18	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20	
19	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22	
20	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24	
21	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26	
22	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28	
23	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30	
24	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31	
25	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33	
30	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39	
Температура воздуха, °С	Психометрическая разность ( $t - t^M$ ), °С										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
	Относительная влажность, %										
40	71,5	48	29	13	–	–	–	–	–	–	–
50	74	54	36,5	22	11,5	1,5	–	–	–	–	–
60	76,5	57,5	42	28,5	18	9,5	2,5	–	–	–	–
70	78,5	60,5	45,5	33,5	23,5	15,5	5	3	–	–	–
80	80	63	49	37,5	28	20	13,5	8	3	1	–
90	81,5	65,5	52,5	41	31,5	24	17,5	12	8	4,5	1
100	82,5	67,5	55	44	35	27	21	15,5	11	7,5	4

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

---

**КАФЕДРА ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ  
ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Кафедра организована в 1976 году профессором, д.т.н. Лепилиным В.Н. Основное научное направление деятельности кафедры разработка новых процессов и их аппаратного оформления в области пищевых биотехнологий. За время своего существования на кафедре было подготовлено 5 докторов наук, 50 кандидатов технических наук более 200 инженеров-механиков и магистров. Ряд выпускников кафедры являются генеральными директорами крупных российских пищевых предприятий, таких как ОАО «Балтика», «Комбинат Пищевых Продуктов», а также представителями известных зарубежных фирм, имеющими бизнес в России.

Новоселов Александр Геннадьевич  
Гуляева Юлия Николаевна  
Малахов Юрий Леонидович  
Федоров Александр Валентинович

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ  
БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел  
Университета ИТМО  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский прю 49**