

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ

Кафедра Механизации животноводства и переработки с/х  
продукции

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОИЗВОДСТВ**

Методические указания и задания для выполнения контрольной  
работы для студентов направления 19.04.01 Биотехнология  
(уровень магистратуры), профиль **Биотехнология**

Новосибирск 2022 г.

УДК 664

Мезенов А.А. Процессы и аппараты биотехнологических производств. Методические указания и задание для выполнения контрольной работы для студентов направления 19.04.01 Биотехнология (уровень магистратуры), профиль **Биотехнология** / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. институт. – Новосибирск, 2022. – 32 с.

Даны методические указания и задание для контрольной работы по курсу "Процессы и аппараты биотехнологических производств" и рекомендуемая литература для студентов направления 19.04.01 Биотехнология (уровень магистратуры), профиль **Биотехнология**

**СОДЕРЖАНИЕ**

	стр.
Введение	4
Требования к выполнению контрольной работы	5
Варианты заданий	6
Методические рекомендации к решению	13
Список литературы	20
Приложение	21

Дисциплина "Процессы и аппараты биотехнологических производств " - дисциплина базовой части для направления 19.04.01 Биотехнология (уровень магистратуры), профиль **Биотехнология**.

Цель и задачи дисциплины заключаются в подготовке выпускника к решению следующих профессиональных задач:

- анализ проблемных производственных ситуаций, связанных с биотехнологическими процессами;
- решение проблемных задач и вопросов, связанных с совершенствованием или созданием новых производств;
- поиск путей и новых способов решения нестандартных производственных задач, связанных с эксплуатацией биотехнологического оборудования;
- анализ состояния и динамики показателей качества работы технологического оборудования;
- интенсификация реализуемых процессов путем использования современных представлений по биотехнологии.

**знать:**

- основные характеристики и свойства объектов биотехнологии;
- физические, физико-химические законы протекания процессов в аппаратах биотехнологических производств;
- основные физико-математических модели переноса теплоты, массы и импульса применительно к биотехнологическим процессам.

**уметь:**

- выбирать ферментационное и вспомогательное оборудование, производить его расчет, выбрать режим его стерилизации;
- выбрать рациональную схему биотехнологического производства заданного продукта, оценивать технологическую эффективность производства

**владеть:**

- методикой поиска информации
- методикой обработки результатов исследования;
- алгоритмам решения задач по определению параметров аппаратов.

**владеть:**

- методами моделирования и масштабирования биотехнологического процесса
- методами планирования, проведения и обработки биотехнологических экспериментов
- методами расчета основных параметров биотехнологических процессов и оборудования
- методами технического контроля по соблюдению технологической дисциплины в условиях действующего биотехнологического производства

### **Требования к выполнению контрольной работы**

В соответствии с индивидуальным заданием студент должен решить задачу. Данные для решения задачи выбираются студентом из таблицы по шифру.

При выполнении задания и оформлении работы необходимо соблюдать следующие требования:

- 1) выписать условие задачи и исходные данные;
- 2) решение задачи следует сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором необходимо указать, какая величина определяется и по какой формуле, какие величины подставляются в формулу и откуда они взяты (из условия задачи, из справочника или были определены и т.д.);
- 3) размерности всех величин, подставляемых в расчетные формулы, должны быть выражены в системе СИ. Если исходная величина, взятая из справочников, выражена в другой размерности, последнюю надо перевести в систему СИ и только после этого подставлять эту величину в формулу;
- 4) после решения задачи должен быть выполнен краткий анализ полученных результатов.

5) контрольная работа выполняется с применением печатающих и графических устройств вывода ЭВМ. Каждый лист пояснительной записки оформляется рамкой и основной надписью по форме 2 (высотой 40 мм) для первого или заглавного листа и форме 2а (высотой 15 мм) для последующих листов. Расстояние по бокам от рамки формы до границ текста в начале и в конце строк – не менее 3 мм. Расстояние от верхней или нижней строки текста до верхней или

нижней рамки должно быть не менее 10 мм. Абзацы в тексте начинают отступом, равным 15-17 мм. Опечатки, описки и графические неточности, обнаруженные в процессе выполнения документа, допускается исправлять подчисткой или закрашиванием белой краской и нанесением на том же месте исправленного текста (графики) машинописным или рукописным способом.

Контрольная работа, выполненная не по своему индивидуальному заданию, к рассмотрению не принимаются.

Студенты, выполнившие и защитившие контрольную работу, допускаются к зачету.

Вариант задания для выполнения контрольной работы выбирается по последней цифре в номере зачетной книжки.

### Варианты заданий

#### Вариант 1

Рассчитать и спроектировать установку для непрерывной стерилизации питательной среды для культивирования микроорганизмов, продуцентов лизина, состоящую из: смесителя, подогревателя, выдерживателя и теплообменника для охлаждения среды, подаваемой в ферментер, объемом  $V = 40 \text{ м}^3$ .

Параметры процесса и показатели качества среды следующие:

$\rho_c = 1100 \text{ кг/м}^3$  – плотность среды.

$\mu_c = 0,00151 \text{ Па} \cdot \text{с}$  – динамическая вязкость.

Время заполнения ферментера – 2 ч.

$V_{\text{см}}^p = 0,7 V_{\text{ферм}}^p$ .

$\eta_3 = 0,7$  - коэффициент заполнения смесителя средой.

$D_{\text{вн.}} = 2 \text{ м}$  - внутренний диаметр смесителя.

$\delta = 6 \text{ мм}$  - толщина стенок корпуса.

Мешалка 3-х лопастная пропеллерная,  $d_m = 0,33 \cdot D_{\text{вн.}}$ . Среда нагревается в колонке непрерывного действия открытым паром при  $p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$  с  $25^\circ \text{C}$  до  $125^\circ \text{C}$ . Длительность процесса стерилизации, выдерживания и охлаждения среды 3 ч.

Потери тепла в окружающую среду 5 %.

Выдержка среды в течение 30 мин в аппарате трубчатого типа: трубы вертикальные, диаметром  $350 \cdot 8 \text{ мм}$ , длиной по 5 м.

Охлаждение простерилизованной питательной среды идет в теплообменнике типа "труба в трубе" до  $30^\circ \text{C}$ .

Температура воды начальная  $t_1' = 20^\circ \text{C}$ , конечная  $t_2' = 96^\circ \text{C}$ .

Диаметр внутренних труб теплообменника  $d_{\text{вн}} = 70/78 \text{ мм}$ ; наружных –  $d_{\text{н}} = 120/128 \text{ мм}$ . Материал – сталь.

#### Вариант 2

Рассчитать и спроектировать установку для непрерывной стерилизации питательной среды для культивирования микроорганизмов, продуцентов триптофана, состоящую из: смесителя, подогревателя, выдерживателя и теплообменника для охлаждения среды, подаваемой в ферментер, объемом  $V = 50 \text{ м}^3$ .

Параметры процесса и показатели качества среды следующие:

$\rho_c = 1150 \text{ кг/м}^3$  – плотность среды.

$\mu_c = 0,00140 \text{ Па} \cdot \text{с}$  – динамическая вязкость.

Время заполнения ферментера – 3 ч.

$$V_{\text{см}}^p = 0,7 V_{\text{ферм}}^p.$$

$\eta_3 = 0,7$  - коэффициент заполнения смесителя средой.

$D_{\text{вн.}} = 2,5$  м - внутренний диаметр смесителя.

$\delta = 8$  мм - толщина стенок корпуса.

Мешалка 3-х лопастная пропеллерная,  $d_m = 0,33 \cdot D_{\text{вн.}}$ . Среда нагревается в колонке непрерывного действия открытым паром при  $p = 4 \cdot 10^5$  Па с 25 °С до 125 °С. Длительность процесса стерилизации, выдерживания и охлаждения среды 2,5 ч.

Потери тепла в окружающую среду 5 %.

Выдержка среды в течение 40 мин в аппарате трубчатого типа: трубы вертикальные, диаметром 350·8 мм, длиной по 5 м.

Охлаждение простерилизованной питательной среды идет в теплообменнике типа "труба в трубе" до 30 °С.

Температура воды начальная  $t_1' = 20$  °С, конечная  $t_2' = 90$  °С.

Диаметр внутренних труб теплообменника  $d_{\text{вн}} = 70/78$  мм; наружных –  $d_{\text{н}} = 120/128$  мм. Материал – сталь.

### **Вариант 3**

Рассчитать и спроектировать установку для непрерывной стерилизации питательной среды для культивирования микроорганизмов, продуцентов амилалитических ферментов, состоящую из: смесителя, подогревателя, выдерживателя и теплообменника для охлаждения среды, подаваемой в ферментер, объемом  $V = 25$  м<sup>3</sup>.

Параметры процесса и показатели качества среды следующие:

$\rho_c = 1120$  кг/м<sup>3</sup> – плотность среды.

$\mu_c = 0,00150$  Па·с – динамическая вязкость.

Время заполнения ферментера – 4 ч.

$$V_{\text{см}}^p = 0,7 V_{\text{ферм}}^p.$$

$\eta_3 = 0,7$  - коэффициент заполнения смесителя средой.

$D_{\text{вн.}} = 2,2$  м – внутренний диаметр смесителя.

$\delta = 6,5$  мм - толщина стенок корпуса.

Мешалка 3-х лопастная пропеллерная,  $d_m = 0,33 \cdot D_{\text{вн.}}$ . Среда нагревается в колонке непрерывного действия открытым паром при  $p = 4 \cdot 10^5$  Па с 25 °С до 125 °С. Длительность процесса стерилизации, выдерживания и охлаждения среды 3,5 ч.

Потери тепла в окружающую среду 5 %.

Выдержка среды в течение 35 мин в аппарате трубчатого типа: трубы вертикальные, диаметром 350·8 мм, длиной по 5 м.

Охлаждение простерилизованной питательной среды идет в теплообменнике типа "труба в трубе" до 30 °С.

Температура воды начальная  $t_1' = 20$  °С, конечная  $t_2' = 85$  °С.

Диаметр внутренних труб теплообменника  $d_{\text{вн}} = 70/78$  мм;  
наружных –  $d_{\text{н}} = 120/128$  мм. Материал – сталь.

#### **Вариант 4**

Рассчитать и спроектировать установку для непрерывной стерилизации питательной среды для культивирования микроорганизмов, продуцентов амилалитических ферментов, состоящую из: смесителя, подогревателя, выдерживателя и теплообменника для охлаждения среды, подаваемой в ферментер, объемом  $V = 35 \text{ м}^3$ .

Параметры процесса и показатели качества среды следующие:

$\rho_c = 1100 \text{ кг/м}^3$  – плотность среды.

$\mu_c = 0,00150 \text{ Па} \cdot \text{с}$  – динамическая вязкость.

Время заполнения ферментера – 2,5 ч.

$V_{\text{см}}^p = 0,7 V_{\text{ферм}}^p$

$\eta_3 = 0,7$  - коэффициент заполнения смесителя средой.

$D_{\text{вн.}} = 2,2 \text{ м}$  – внутренний диаметр смесителя.

$\delta = 6,5 \text{ мм}$  - толщина стенок корпуса.

Мешалка 3-х лопастная пропеллерная,  $d_m = 0,33 \cdot D_{\text{вн.}}$ . Среда нагревается в колонке непрерывного действия открытым паром при  $p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$  с  $30^\circ \text{C}$  до  $130^\circ \text{C}$ . Длительность процесса стерилизации, выдерживания и охлаждения среды 3,5 ч.

Потери тепла в окружающую среду 5 %.

Выдержка среды в течение 45 мин в аппарате трубчатого типа: трубы вертикальные, диаметром 350·8 мм, длиной по 5 м.

Охлаждение простерилизованной питательной среды идет в теплообменнике типа "труба в трубе" до  $30^\circ \text{C}$ .

Температура воды начальная  $t_1' = 20^\circ \text{C}$ , конечная  $t_2' = 95^\circ \text{C}$ .

Диаметр внутренних труб теплообменника  $d_{\text{вн}} = 70/78$  мм; наружных –  $d_{\text{н}} = 120/128$  мм. Материал – сталь.

#### **Вариант 5**

Рассчитать и спроектировать установку для непрерывной стерилизации питательной среды для культивирования микроорганизмов, продуцентов лизина, состоящую из: смесителя, подогревателя, выдерживателя и теплообменника для охлаждения среды, подаваемой в ферментер, объемом  $V = 60 \text{ м}^3$ .

Параметры процесса и показатели качества среды следующие:

$\rho_c = 1250 \text{ кг/м}^3$  – плотность среды.

$\mu_c = 0,00151 \text{ Па} \cdot \text{с}$  – динамическая вязкость.

Время заполнения ферментера – 2 ч.

$V_{\text{см}}^p = 0,7 V_{\text{ферм}}^p$

$\eta_3 = 0,7$  - коэффициент заполнения смесителя средой.



$D_{\text{вн.}} = 2 \text{ м}$  - внутренний диаметр смесителя.

$\delta = 6 \text{ мм}$  - толщина стенок корпуса.

Мешалка 3-х лопастная пропеллерная,  $d_m = 0,33 \cdot D_{\text{вн.}}$ . Среда нагревается в колонке непрерывного действия открытым паром при  $p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$  с  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Длительность процесса стерилизации, выдерживания и охлаждения среды 3,5 ч.

Потери тепла в окружающую среду 5 %.

Выдержка среды в течение 40 мин в аппарате трубчатого типа: трубы вертикальные, диаметром  $350 \cdot 8 \text{ мм}$ , длиной по 5 м.

Охлаждение простерилизованной питательной среды идет в теплообменнике типа "труба в трубе" до  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Температура воды начальная  $t_1' = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , конечная  $t_2' = 98 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Диаметр внутренних труб теплообменника  $d_{\text{вн}} = 70/78 \text{ мм}$ ; наружных –  $d_{\text{н}} = 120/128 \text{ мм}$ . Материал – сталь.

### **Вариант 6**

Рассчитать и спроектировать установку для непрерывной стерилизации питательной среды для культивирования микроорганизмов, продуцентов триптофана, состоящую из: смесителя, подогревателя, выдерживателя и теплообменника для охлаждения среды, подаваемой в ферментер, объемом  $V = 30 \text{ м}^3$ .

Параметры процесса и показатели качества среды следующие:

$\rho_c = 1100 \text{ кг/м}^3$  – плотность среды.

$\mu_c = 0,00140 \text{ Па} \cdot \text{с}$  – динамическая вязкость.

Время заполнения ферментера – 3 ч.

$V_{\text{см}}^p = 0,7 V_{\text{ферм}}^p$ .

$\eta_z = 0,68$  - коэффициент заполнения смесителя средой.

$D_{\text{вн.}} = 2,0 \text{ м}$  - внутренний диаметр смесителя.

$\delta = 6 \text{ мм}$  - толщина стенок корпуса.

Мешалка 3-х лопастная пропеллерная,  $d_m = 0,34 \cdot D_{\text{вн.}}$ . Среда нагревается в колонке непрерывного действия открытым паром при  $p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$  с  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ . Длительность процесса стерилизации, выдерживания и охлаждения среды 2 ч.

Потери тепла в окружающую среду 5 %.

Выдержка среды в течение 30 мин в аппарате трубчатого типа: трубы вертикальные, диаметром  $350 \cdot 8 \text{ мм}$ , длиной по 5 м.

Охлаждение простерилизованной питательной среды идет в теплообменнике типа "труба в трубе" до  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Температура воды начальная  $t_1' = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , конечная  $t_2' = 92 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Диаметр внутренних труб теплообменника  $d_{\text{вн}} = 70/78 \text{ мм}$ ; наружных –  $d_{\text{н}} = 120/128 \text{ мм}$ . Материал – сталь.

### **Вариант 7**

Рассчитать и спроектировать установку для непрерывной стерилизации питательной среды для культивирования микроорганизмов, продуцентов лизина, состоящую из: смесителя, подогревателя, выдерживателя и теплообменника для охлаждения среды, подаваемой в ферментер, объемом  $V = 40 \text{ м}^3$ .

Параметры процесса и показатели качества среды следующие:

$\rho_c = 1150 \text{ кг/м}^3$  – плотность среды.

$\mu_c = 0,00151 \text{ Па} \cdot \text{с}$  – динамическая вязкость.

Время заполнения ферментера – 2 ч.

$V_{\text{см}}^p = 0,7 V_{\text{ферм}}^p$ .

$\eta_z = 0,8$  - коэффициент заполнения смесителя средой.

$D_{\text{вн.}} = 5 \text{ м}$  - внутренний диаметр смесителя.

$\delta = 6 \text{ мм}$  - толщина стенок корпуса.

Мешалка 3-х лопастная пропеллерная,  $d_m = 0,46 \cdot D_{\text{вн.}}$ . Среда нагревается в колонке непрерывного действия открытым паром при  $p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$  с  $25^\circ \text{C}$  до  $125^\circ \text{C}$ . Длительность процесса стерилизации, выдерживания и охлаждения среды 3 ч.

Потери тепла в окружающую среду 5 %.

Выдержка среды в течение 30 мин в аппарате трубчатого типа: трубы вертикальные, диаметром  $350 \cdot 8 \text{ мм}$ , длиной по 5 м.

Охлаждение простерилизованной питательной среды идет в теплообменнике типа "труба в трубе" до  $30^\circ \text{C}$ .

Температура воды начальная  $t_1' = 20^\circ \text{C}$ , конечная  $t_2' = 96^\circ \text{C}$ .

Диаметр внутренних труб теплообменника  $d_{\text{вн}} = 70/78 \text{ мм}$ ; наружных –  $d_{\text{н}} = 120/128 \text{ мм}$ . Материал – сталь.

### **Вариант 8**

Рассчитать и спроектировать установку для непрерывной стерилизации питательной среды для культивирования микроорганизмов, продуцентов лизина, состоящую из: смесителя, подогревателя, выдерживателя и теплообменника для охлаждения среды, подаваемой в ферментер, объемом  $V = 40 \text{ м}^3$ .

Параметры процесса и показатели качества среды следующие:

$\rho_c = 2100 \text{ кг/м}^3$  – плотность среды.

$\mu_c = 0,00151 \text{ Па} \cdot \text{с}$  – динамическая вязкость.

Время заполнения ферментера – 1,7 ч.

$V_{\text{см}}^p = 0,7 V_{\text{ферм}}^p$ .

$\eta_z = 0,75$  - коэффициент заполнения смесителя средой.

$D_{\text{вн.}} = 1,8 \text{ м}$  - внутренний диаметр смесителя.

$\delta = 5 \text{ мм}$  - толщина стенок корпуса.

Мешалка 3-х лопастная пропеллерная,  $d_m = 0,33 \cdot D_{\text{вн.}}$ . Среда нагревается в колонке непрерывного действия открытым паром при  $p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$  с  $25^\circ \text{C}$  до

125 °С. Длительность процесса стерилизации, выдерживания и охлаждения среды 3 ч.

Потери тепла в окружающую среду 5 %.

Выдержка среды в течение 40 мин в аппарате трубчатого типа: трубы вертикальные, диаметром 350·8 мм, длиной по 5 м.

Охлаждение простерилизованной питательной среды идет в теплообменнике типа "труба в трубе" до 30 °С.

Температура воды начальная  $t_1' = 20$  °С, конечная  $t_2' = 96$  °С.

Диаметр внутренних труб теплообменника  $d_{\text{вн}} = 70/78$  мм; наружных –  $d_{\text{н}} = 120/128$  мм. Материал – сталь.

### **Вариант 9**

Рассчитать и спроектировать установку для непрерывной стерилизации питательной среды для культивирования микроорганизмов, продуцентов лизина, состоящую из: смесителя, подогревателя, выдерживателя и теплообменника для охлаждения среды, подаваемой в ферментер, объемом  $V = 40 \text{ м}^3$ .

Параметры процесса и показатели качества среды следующие:

$\rho_c = 2200 \text{ кг/м}^3$  – плотность среды.

$\mu_c = 0,00151 \text{ Па} \cdot \text{с}$  – динамическая вязкость.

Время заполнения ферментера – 2 ч.

$V_{\text{см}}^p = 0,7 V_{\text{ферм}}^p$ .

$\eta_3 = 0,7$  - коэффициент заполнения смесителя средой.

$D_{\text{вн}} = 3 \text{ м}$  - внутренний диаметр смесителя.

$\delta = 6 \text{ мм}$  - толщина стенок корпуса.

Мешалка 3-х лопастная пропеллерная,  $d_m = 0,33 \cdot D_{\text{вн}}$ . Среда нагревается в колонке непрерывного действия открытым паром при  $p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$  с 25 °С до 125 °С. Длительность процесса стерилизации, выдерживания и охлаждения среды 4 ч.

Потери тепла в окружающую среду 5 %.

Выдержка среды в течение 40 мин в аппарате трубчатого типа: трубы вертикальные, диаметром 350·8 мм, длиной по 5 м.

Охлаждение простерилизованной питательной среды идет в теплообменнике типа "труба в трубе" до 30 °С.

Температура воды начальная  $t_1' = 20$  °С, конечная  $t_2' = 96$  °С.

Диаметр внутренних труб теплообменника  $d_{\text{вн}} = 70/78$  мм; наружных –  $d_{\text{н}} = 120/128$  мм. Материал – сталь.

### **Вариант 10**

Рассчитать и спроектировать установку для непрерывной стерилизации питательной среды для культивирования микроорганизмов, продуцентов лизина, состоящую из: смесителя, подогревателя, выдерживателя

и теплообменника для охлаждения среды, подаваемой в ферментер, объемом  $V = 40 \text{ м}^3$ .

Параметры процесса и показатели качества среды, следующие:

$\rho_c = 3100 \text{ кг/м}^3$  – плотность среды.

$\mu_c = 0,00151 \text{ Па} \cdot \text{с}$  – динамическая вязкость.

Время заполнения ферментера – 2 ч.

$V_{\text{см}}^p = 0,7 V_{\text{ферм}}^p$ .

$\eta_z = 0,8$  - коэффициент заполнения смесителя средой.

$D_{\text{вн.}} = 2,5 \text{ м}$  - внутренний диаметр смесителя.

$\delta = 6 \text{ мм}$  - толщина стенок корпуса.

Мешалка 3-х лопастная пропеллерная,  $d_m = 0,33 \cdot D_{\text{вн.}}$ . Среда нагревается в колонке непрерывного действия открытым паром при  $p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$  с  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ . Длительность процесса стерилизации, выдерживания и охлаждения среды 3 ч.

Потери тепла в окружающую среду 5 %.

Выдержка среды в течение 50 мин в аппарате трубчатого типа: трубы вертикальные, диаметром  $350 \cdot 8 \text{ мм}$ , длиной по 5 м.

Охлаждение простерилизованной питательной среды идет в теплообменнике типа "труба в трубе" до  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Температура воды начальная  $t_1' = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , конечная  $t_2' = 96 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Диаметр внутренних труб теплообменника  $d_{\text{вн}} = 70/78 \text{ мм}$ ; наружных –  $d_{\text{н}} = 120/128 \text{ мм}$ . Материал – сталь.

## Методические рекомендации к решению контрольной работы

### Расчет смесителя для среды, подаваемой в маточник

**Задание.** Определить основные размеры смесителя и мощность приводного электродвигателя механической мешалки. В смесителе готовится среда для маточника полезным объемом  $2,5 \text{ м}^3$  (10 % от объема ферментатора). Плотность перемешиваемой среды  $\rho_c = 1050 \text{ кг/м}^3$ , динамическая вязкость  $\mu_c = 0,00131 \text{ Па} \cdot \text{с}$ . Маточник заполняется в течение 30 мин.

Замес может готовиться в процессе заполнения, поэтому рабочий объем смесителя  $V_{\text{см}}^p$  может быть меньше рабочего объема маточника  $V_{\text{мат}}^p$ .

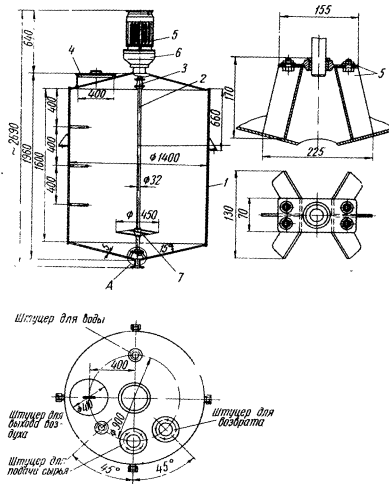


Рис. 70а. Смеситель для приготовления питательной среды (общий вид)

**Расчет.** Принимаем  $V_{\text{см}}^p = 0,7 \cdot V_{\text{мат}}^p = 0,7 \cdot 2,5 = 1,75 \text{ м}^3$ .

Полный расчетный объем смесителя:

$$V_{\text{см}} = V_{\text{см}}^p / \eta_z = 1,75 / 0,7 = 2,5 \text{ м}^3,$$

где  $\eta_z$  – коэффициент заполнения смесителя средой,  $\eta_z = 0,7$ .

Принимаем внутренний диаметр аппарата  $D_{\text{вн}} = 1,4 \text{ м}$ .

Высота верхнего и нижнего конусов:

$$H = (D_{\text{вн}}/2) \cdot \operatorname{tg} \alpha = (1400/2) \cdot \operatorname{tg} 15^\circ = 187,5 \text{ мм} = 0,1875 \text{ м}.$$

Объем конуса:

$$V_k = \pi \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot h / (4 \cdot 3)$$

$$V_k = 3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 0,1875 / (3 \cdot 4) = 0,096 \text{ м}^3.$$

Объем конической крышки не является рабочим, поэтому его в расчет не принимаем.

Объем цилиндрической части:

$$V_{\text{ц}} = 2,5 - 0,096 = 2,404 \text{ м}^3.$$

Высота цилиндрической части смесителя:

$$H_{\text{ц}} = V_{\text{ц}} / F = 2,404 / [(3,14 \cdot 1,4^2) / 4] = 1,562 \text{ м}.$$

Принимаем  $H_{ц} = 1600$  мм.

Полезный конструктивный объем смесителя:

$$V_{см} = (3,14 \cdot 1,4^2/4) \cdot 1,6 + 2 \cdot 1/3 \cdot (3,14 \cdot 1,4^2/4) \cdot 0,1875 = 2,65 \text{ м}^3.$$

Истинный рабочий объем смесителя:

$$V_{см}^p = 2,65 \cdot 0,7 = 1,85 \text{ м}^3.$$

Аппарат работает при атмосферном давлении, поэтому толщину стенок корпуса принимаем по соображениям обеспечения жесткости конструкции с учетом нагрузки от привода мешалки  $\delta = 5$  мм.

Механическую мешалку смесителя рассчитываем по данным отраслевой нормали НИИхиммаша ОН-12-23-61М.

Для приготовления суспензий с содержанием до 10 %-ной твердой фазы, рекомендуется применять пропеллерные мешалки, обеспечивающие быстрое и интенсивное перемешивание. Принимаем к установке трехлопастную пропеллерную мешалку.

Согласно нормам, диаметр мешалки:

$$d_m = (0,3 \div 0,33) \cdot D_{вн} = 0,33 \cdot 1400 = 462 \text{ мм} = 0,462 \text{ м}.$$

Принимаем  $d_m = 0,45$  м.

Число оборотов мешалки:

$$n = w/(\pi \cdot d_m) = 4,8/(3,14 \cdot 0,45) = 3,4 \text{ об/мин},$$

где  $w$  – окружная скорость мешалки, при  $\mu_c = 0,00131 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $w = 4,8 \text{ м/с}$ .

**Оптимальные окружные скорости перемешивающих устройств в зависимости от вязкости перемешиваемой среды**

Перемешивающие устройства	Вязкость среды $\rho_c$ в н·сек/м <sup>2</sup>	Оптимальная окружная скорость мешалки $\omega$ в м/сек
Лопастные, якорные, рамные	0,001—4	3,0—2,0
	4—8	2,5—1,5
	8—15	1,5—1,0
Турбинные	0,001—5	7—4,2
	5—15	4,2—3,4
	15—25	3,4—2,3
Пропеллерные	0,001—2	4,8—16

Число оборотов мешалки должно быть увязано с приводом.

По каталогу НИИхиммаша подбираем вертикальный цилиндрический редуктор с числом оборотов выходного вала 180 об/мин, тип ВО-I-1,7/180-1000, электродвигатель АОП 42-6,  $N = 1,7 \text{ кВт}$ ,  $n = 930 \text{ об/мин}$ . Таким образом, число оборотов мешалки в секунду:

$$N = 180/60 = 3 \text{ об/с}.$$

Мощность, потребную для перемешивания среды мешалкой при установившемся режиме в аппарате без учета вспомогательных устройств, определим по формуле:

$$N_M = K_N \cdot \rho_c \cdot n^3 \cdot d^5 = 0,435 \cdot 1050 \cdot 3^3 \cdot 0,45^5 = 230 \text{ Вт},$$

где  $\rho_c$  – плотность среды, 1050 кг/м<sup>3</sup>;

$n$  – число оборотов мешалки, 3 об/с;

$d$  – диаметр мешалки, 0,45 м.

Критерий мощности  $K_N$  зависит от интенсивности перемешивания, которая характеризуется значением центробежного критерия Рейнольдса:

$$Re_{ц} = \rho \cdot n \cdot d_m^2 / \mu_c = 1050 \cdot 3 \cdot 0,45^2 / 0,00131 = 487000,$$

где  $\rho$  – плотность среды, 1050 кг/м<sup>3</sup>;

$n$  – число оборотов мешалки, 3 об/с;

$\mu_c$  – динамическая вязкость среды, 0,00013 Па · с.

По графику нормали НИИХиммаша находим значение  $K_N = f(Re_{ц})$ .

Из графика имеем:

$$K_N \cdot [g/(n^2 \cdot d_m)]^m = 0,23.$$

Отсюда критерий мощности  $K_N = 0,23/[g/(n^2 \cdot d_m)]^m = 0,23/0,529 = 0,435$ , где  $[g/(n^2 \cdot d_m)]^m = [g/(n^2 \cdot d_m)]^{(a - \lg Re_{ц})/b} = [9,81/(3^2 \cdot 0,45)]^{(2,1 - \lg 487000)/18} = 0,529$ , где

$d = 2,1$ ;  $b = 18$  – коэффициенты, принятые из графика.

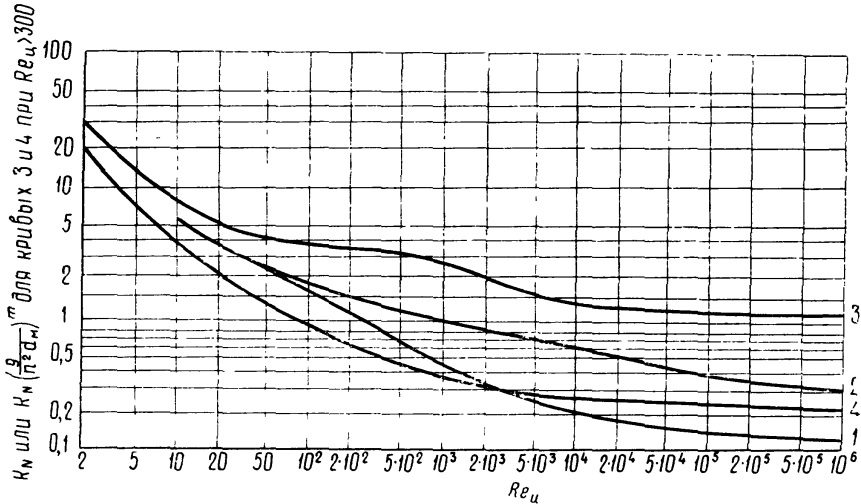


Рис. 71. График для определения критерия мощности  $K_N$  в зависимости от критерия  $Re_{ц}$  и типа перемешивающего устройства:

1 – для лопастных перемешивающих устройств; 2 – для якорных и рамных

3 – для турбинных; 4 – для пропеллерных;  $m = \frac{a - \lg Re_{ц}}{b}$ ,

где для кривой 3  $a=1$  и  $b=40$ ; для кривой 4  $a=2,1$  и  $b=18$ .

Расчетная мощность на валу мешалки:

$$N' = K_1 \cdot K_2 \cdot (\sum K + 1) \cdot N_m = 1 \cdot 1,3 \cdot (0,5 + 1) \cdot 0,23 = 0,45 \text{ кВт},$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий степень заполнения аппарата средой:

$$K_1 = H_{\text{ж}}/D_{\text{вн}} = 1,4/1,4 = 1,$$

где  $H_{\text{ж}} = (0,8 \div 1,2)$   $D_{\text{вн}}$  – высота слоя перемешиваемой жидкости в аппарате, принимаем  $H_{\text{ж}} = D_{\text{вн}} = 1,4$  м.

$K_2$  – коэффициент, учитывающий увеличение потребляемой мощности при пуске или в результате увеличения сопротивления среды при перемешивании; при перемешивании среды из-за добавления к ней компонентов может измениться сопротивление среды, поэтому согласно нормам ОН-12-23-61, принимаем  $K_2 = 1,3$ .

Сумма коэффициентов, учитывающих увеличение мощности из-за наличия в аппарате вспомогательных устройств (для сред с  $\mu_c \leq 0,1$  Па·с)  $\sum K = 0,5$ .

Установочная мощность приводного электродвигателя:

$$N_{\text{уст}} = 1,2 \cdot N'/\eta_p = 1,2 \cdot 0,45/0,9 = 0,6 \text{ кВт},$$

где 1,2 и 0,9 – коэффициент запаса мощности и КПД редуктора.

#### *6. Аппараты для стерилизации и охлаждения питательных сред*

Подогреватель для питательной среды, поступающей в ферментер

Задание. Среда нагревается в колонке непрерывного действия открытым паром при  $P = 49$  МПа с 30 до 130°C. Пар вводится в массу через отверстия. Количество питательной среды для ферментатора 18 м<sup>3</sup>. Длительность процессов стерилизации, выдерживания и охлаждения среды – 2 ч. Производительность стерилизационной колонки – объем подогреваемой массы:  $V_{\text{с.к}} = 18/2 = 9$  м<sup>3</sup>/ч.



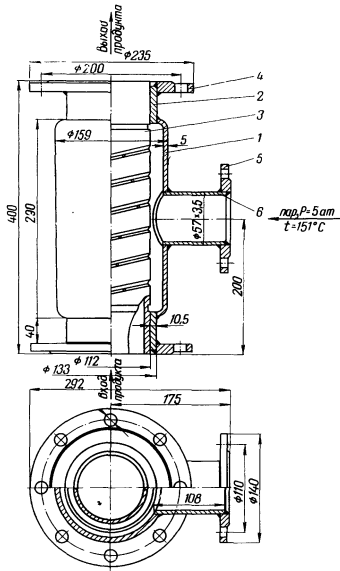


Рис. 5. Подогреватель жидкой питательной среды для глубинного культивирования плесневых грибов:

1 – корпус; 2 и 6 – патрубки; 3 – греющий элемент; 4 и 5 – фланцы

Количество тепла, необходимое для нагревания массы:

$$Q_n = V_{с.к.} \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1) = (9 \cdot 1065/3600) \cdot 4186 \cdot (130 - 30) = 1115 \cdot 10^3$$

Вт

где  $\rho$  – плотность среды (объемная масса), 1065 кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – теплоемкость среды, 4186 Дж/(кг · град);

$t_1$  и  $t_2$  – начальная и конечная температуры среды:  $t_1 = 30^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 130^\circ\text{C}$ .

Расход тепла на стерилизацию среды с учетом потерь тепла в окружающую среду в размере 2 %:

$$Q_{ст} = 1,02 \cdot Q_n = 1,02 \cdot 1115 \cdot 10^3 = 1137 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

Расход пара на стерилизацию:

$$D_n = Q_{ст}/(I_n - I_k) = 1137 \cdot 10^3/(2758 \cdot 10^3 - 547,2 \cdot 10^3) = 0,515 \text{ кг/с,}$$

где  $I_n$  – энтальпия греющего пара;

$I_k$  – энтальпия конденсата при 130 °C

Объемный расход пара на стерилизацию:

$$V_{\text{п}} = D_{\text{п}} \cdot v = 1855 \cdot 0,3818 = 710 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где  $v$  – удельный объем насыщенного водяного пара, при  $p = 0,49$

МПа.

Скорость истечения пара из отверстий в нагревательной колонке:

$$w = 91,544 \cdot \varphi \cdot \sqrt{I' - I''} = 91,544 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{657,3 - 650,6} = 213,5 \text{ м/с},$$

где  $\varphi$  – коэффициент скорости, 0,9;

$I'$  – энтальпия пара при входе в отверстие;

$I''$  – энтальпия пара при выходе из отверстия и смешивании с нагреваемой средой.

Суммарная площадь отверстий в подогревателе среды, необходимых для ввода греющего пара:

$$\Sigma f = V_{\text{п}} / (3600 \cdot w) = 710 / (3600 \cdot 213,5) = 0,000924 \text{ м}^2 = 924 \text{ мм}^2.$$

Количество отверстий диаметром 2 мм для ввода пара в среду:

$$n = \Sigma f / f_o = 924 / 3,14 = 294,$$

где  $f_o$  – площадь одного отверстия диаметром 2 мм,

$$f_o = (\pi \cdot D^2) / 4 = (3,14 \cdot 2^2) / 4 = 3,14 \text{ мм}^2.$$

На внутреннем цилиндре нагревателя диаметром 112 мм принимаем 6 рядов отверстий – по  $294 / 6 = 49$  отверстий в ряду.

Скорость движения среды в подогревателе:

$$w_c = V_{\text{см}} / (3600 \cdot f_n) = 9 / (3600 \cdot 0,008495) = 0,294 \text{ м/с}, \text{ где}$$

$$f_n = (\pi \cdot d_{\text{вн}}^2) / 4 = (3,14 \cdot 0,104^2) / 4 = 0,008495 \text{ м}^2,$$

где  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр стакана для прохода массы, 0,104 м.

$$\tau = l / w_c = 0,4 / 0,294 = 1,36 \text{ с},$$

где  $l$  – длина греющего цилиндра, 0,4 м.

### Выдерживатель для нагретой среды, поступающей в ферментер

Задание. Для обеспечения стерильности среду, подаваемую в ферментаторы, после предварительного подогрева до 130 °С выдерживают в течение 15 мин в аппарате трубчатого типа. Среда движется в выдерживателе непрерывно. Длина пути и объем его должны обеспечить заданную производительность и необходимое время пребывания среды при температуре стерилизации.

Выдерживатель состоит из 10 вертикальных труб диаметром  $0,325 \cdot 0,008$  м и длиной 4 м, не считая соединительных колен.

Производительность выдерживателя:

$$V_{\text{в}} = V_{\text{с}} + D_{\text{п}} / \rho = 9 + 1855 / 934,5 = 11 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где  $V_{\text{с}}$  – часовой расход исходной среды, подаваемый в ферментер,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$D_{\text{п}}$  – конденсат пара, израсходованного для открытого подогрева массы,  $\text{кг/ч}$ ;

19

$\rho$  - плотность воды, при 130 °С  $\rho = 934,5 \text{ кг/м}^3$

Принимаем для выдерживателя трубы диаметром 0,325/0,309 м с вертикальным расположением последовательно соединенных участков длиной по 4 м.

Скорость движения среды по трубам выдерживателя:

$$w = V_{\text{в}}/60f = 11/(60 \cdot 0,075) = 2,22 \text{ м/мин},$$

где  $f$  - сечение труб выдерживателя,

$$f = (\pi \cdot d^2)/4 = (3,14 \cdot 0,309^2)/4 = 0,075 \text{ м}^2.$$

Потребная длина труб выдерживателя, обеспечивающая время пребывания среды в нем равное 15 мин:

$$L = \tau \cdot w = 15 \cdot 2,22 = 33,3 \text{ м}.$$

Количество вертикальных участков в выдерживателе:

$$n = 33,3/4 = 8,35.$$

Принимаем 8 вертикальных расположенных участков.

*Расчет теплообменника для охлаждения среды, подаваемой в ферментатор*

Простерилизованную питательную среду для выращивания культуры плесневых грибов после выдерживания при 130 °С охлаждают в теплообменнике до 30 °С. Для этой цели применяют теплообменники типа "труба в трубе". Продукт направляют по внутренним трубам сверху вниз; воду – по кольцевому пространству снизу вверх.

Применяют также и теплообменники оросительного типа. Для обеспечения стерильности лучше применять закрытые теплообменники.

Задание. Рассчитать теплообменник для охлаждения от 130 °С до 30 °С среды, подаваемой из выдерживателя в ферментатор. Количество охлаждаемой среды – 11 м<sup>3</sup>/ч. Для охлаждения применяется вода с температурой 15 °С. Температура воды при выходе из теплообменника – 90 °С, расход пара на стерилизацию  $D_{\text{п}} = 1855 \text{ кг/ч}$ ,  $\rho_{\text{с}} = 1065 \text{ кг/м}^3$ ,  $V_{\text{с.к}} = 9 \text{ м}^3/\text{ч}$  – приняты из предыдущего расчета. Теплоемкость среды  $c = 4186 \text{ Дж/(кг/град)}$ . Материал теплообменника – стальные трубы, диаметр внутренних труб  $d = 0,068/0,076 \text{ м}$ , наружных – 0,119/0,127 м.

Количество тепла, отводимого от охлаждаемой среды:

$$Q = G_{\text{с}} \cdot c_{\text{с}} \cdot (t_1 - t_2) = (11440/3600) \cdot 4186 \cdot (130 - 30) = 1330 \cdot 10^3 \text{ Вт},$$

где  $G_{\text{с}}$  – количество среды,

$$G_{\text{с}} = V_{\text{с}} \cdot \rho_{\text{с}} + D_{\text{п}} = 9 \cdot 1065 + 1855 = 11440 \text{ кг}.$$

Расход охлаждающей воды на охлаждение среды в теплообменнике:

$$G_{\text{в}} = Q/[c \cdot (t_2' - t_1')] = 1330 \cdot 10^3/[4198 \cdot (90 - 15)] = 4,23 \text{ кг/с},$$

где  $t_1'$  и  $t_2'$  – начальная (15 °С) и конечная (90 °С) температура охлаждающей воды.

При средней температуре  $t_{\text{ср}} = (90 + 15)/2 = 52,5 \text{ °С}$ , удельная теплоемкость воды  $c = 4198 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$ .

Поверхность охлаждения теплообменника:

$$F = Q / (K \cdot \Delta t_{\text{ср}}) = 1144000 / (750 \cdot 25,6) = 59,5 \text{ м}^2.$$

Принимаем  $F = 60 \text{ м}^2$ .

Средняя логарифмическая разность температур при противоточном движении среды и охлаждающей воды:

$$\Delta t_{\text{ср}} = (\Delta t_6 - \Delta t_m) / 2,31 \lg(\Delta t_6 / \Delta t_m) = [(130 - 90) - (30 - 15)] / 2,31 \lg[(130 - 90) / (30 - 15)] = 25,6 \text{ град},$$

где  $\Delta t_6$  – разность между начальной температурой среды и конечной температурой охлаждающей воды,  $\Delta t_6 = t_1 - t_2'$ ;

$\Delta t_m$  – разность между конечной температурой среды и начальной температурой охлаждающей воды,  $\Delta t_m = t_2 - t_1'$ .

Коэффициент теплопередачи от среды к воде:

$$K = 1 / (1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2) = 1 / (1/1200 + 0,004/58,15 + 1/6000) = 950 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}),$$

где  $\delta$  – толщина стенки трубы, 0,004 м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности стали, 58,15 Вт/(м · град);

$\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от среды к стенке теплообменника;

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от стенки теплообменника к охлаждающей воде.

Учитывая возможные загрязнения поверхностей теплообмена, принимаем  $K = 870 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Re охлаждаемой среды, протекающей в трубопроводах теплообменника:

$$Re = w \cdot d_b \cdot \rho / \mu = 0,835 \cdot 0,068 \cdot 1056 / 0,0077 = 7750,$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости среды, при  $t_{\text{ср}} = (130 + 30) / 2 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$   $\mu = 0,0077 \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Скорость воды в трубопроводе:

$$w = G / (3600 \cdot \rho \cdot f) = 11440 / (3600 \cdot 1050 \cdot 0,003632) = 0,835 \text{ м/с},$$

где  $G$  – производительность теплообменника,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$\rho$  – плотность среды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Сечение продуктовой трубы теплообменника:

$$f = (\pi \cdot d_b^2) / 4 = (3,14 \cdot 0,068^2) / 4 = 0,003632 \text{ м}^2,$$

где  $d_b$  – внутренний диаметр трубы теплообменника, по которой течет охлажденная среда, м.

$Re < 2300$  – режим ламинарный;

$2300 < Re < 10000$  – режим переходный;

$Re > 10000$  – режим турбулентный.

В данном случае режим переходный ( $Re = 7750$ ).

Ориентировочные значения коэффициента теплоотдачи и теплопередачи даны в табл. 4.7 и 4.8

Для переходного режима рекомендуется определять коэффициент теплоотдачи по следующей формуле:

$$Nu = K_o \cdot Pr_f^{0,43} \cdot (Pr_f/Pr_{ст})^{0,25} = \alpha_1 \cdot d_{эвб}/\lambda_{ж}.$$

Отсюда коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1 = (\lambda_{ж} / d_{эвб}) \cdot K_o \cdot Pr_f^{0,43} \cdot (Pr_f/Pr_{ст})^{0,25} = (0,572/0,068) \cdot 26 \cdot 53,5^{0,43} \cdot (53,3/52,4)^{0,25} = 1215 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где  $K_o$  – комплекс, зависящий от критерия  $Re$ ,  $K_o = 26$  из таблицы:

$Re \cdot 10^{-3}$	$K_o$	$Re \cdot 10^{-3}$	$K_o$
2,1	1,9	4,0	10,3
2,2	2,2	5,0	15,5
2,3	3,3	6,0	19,5
2,4	3,8	8,0	27,0
2,5	4,4	10,0	33,3
3,0	6,0		

Коэффициент теплопроводности охлаждаемой среды определим ориентировочно по формуле:

$$\lambda_{ж} = A \cdot c \cdot \rho \cdot \sqrt[3]{\rho/M} = 1,29 \cdot 10^{-4} \cdot 0,943 \cdot 1050 \cdot \sqrt[3]{1050/18,5} = 0,572 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}),$$

где  $\rho$  – плотность среды (объемная масса),  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$A$  – коэффициент, зависящий от степени диссоциации жидкости,  $1,29 \cdot 10^{-4}$ ;

$c$  – теплоемкость среды при влажности  $W = 92 \%$ ,

$$c = 0,29 + 0,0071 \cdot W = 0,29 + 0,0071 \cdot 92 = 3950 \text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$M$  – средняя молекулярная масса среды.

Среднюю молекулярную массу среды  $M$  определим ориентировочно как среднюю молекулярную массу мальтозы, растворенной в воде.

В состав среды входит 6 кг кукурузной муки крахмалистостью 50 % на 100 кг раствора: принимаем, что 1 кг раствора состоит из 0,03 кг сахара (крахмала) и 0,97 кг воды, тогда молекулярная масса среды:

$$M = 1/(0,03/M_m + 0,97/M_b) = 1/(0,03/342 + 0,97/18) = 18,5,$$

где  $M_m$  – молекулярная масса мальтозы ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) = 342;

$M_b$  – молекулярная масса воды = 18.

Значение критерия Прандтля при средней температуре среды 80 °С:

$$Pr = (\mu \cdot c)/\lambda_{ж} = (0,0077 \cdot 9950)/0,572 = 53,3.$$

Для определения значения  $Pr_{ст}$  при температуре стенки теплопередающей поверхности среды, температуру стенки принимаем на 5 °С ниже средней температуры среды,  $t_{ст} = 75$  °С. Значения  $c$  и  $\lambda$  будут незначительно отличаться от определения для температуры 80 °С, поэтому пересчета их не производят.

Определим критерий  $Pr_{ст}$  при  $75^\circ C$ :

$$Pr_{ст} = 0,00757 \cdot 3950/0,572 = 52,4.$$

Значение  $\mu$  при  $t = 75^\circ C$ : по формулам Знаменского  $\mu = 0,00757 \text{ Па/с}$ .

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  от стенки теплообменника к охлаждаемой воде определим по формуле для потока кольцевого сечения:

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot (\lambda/d_n) \cdot [D/(D - d_n)]^{0,45} \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0,023 \cdot 0,651/0,076 \cdot [0,119/(0,119 - 0,076)]^{0,45} \cdot 133400^{0,8} \cdot 3,66^{0,4} = 6400 \text{ Вт/(м}^2 \cdot K),$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воды, при  $t_{ср} = 52,5^\circ C$   $\lambda = 0,651 \text{ Вт/(м} \cdot K)$ .

Критерий  $Re$  для этого потока:

$$Re = w \cdot d_{эв} \cdot \rho/\mu = 0,65 \cdot 987 \cdot 0,1105/53 \cdot 10^{-5} = 133400,$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость среды, при среднем  $t = 52,5^\circ C$   $\mu = 53 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

$Re > 1 \cdot 10^4$  – режим турбулентный.

Для кольцевого сечения трубы теплообменника:

$$d_{эв} = D^2 - d_n^2/d_n = (0,119^2 - 0,076^2)/0,076 = 0,1105 \text{ м}.$$

Скорость движения воды в кольцевом сечении теплообменника:

$$w = G_b/(3600 \cdot \rho \cdot f) = 15,25/(3600 \cdot 0,987 \cdot 0,006586) = 0,65 \text{ м/с},$$

где  $\rho$  – плотность воды при средней температуре  $t_{ср} = 52,5^\circ C$   $\rho = 987 \text{ кг/м}^3$ ;

$G_b$  – количество охлаждающей воды, т/ч.

Кольцевое сечение труб теплообменника:

$$f = (\pi/4) \cdot (D^2 - d_n^2) = (3,14/4) \cdot (0,119^2 - 0,076^2) = 0,006586 \text{ м}^2,$$

где  $D$  – внутренний диаметр наружной трубы, 0,119 м;

$d_n$  – наружный диаметр внутренней трубы, 0,076 м.

Критерий Прандтля для воды при  $t_{ср} = 52,5^\circ C$ :

$$Pr = \mu \cdot c/\lambda = 4198 \cdot 53 \cdot 10^{-5}/0,651 = 3,66,$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воды,  $53 \cdot 10^{-5} \text{ Па/с}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вобликова, Т.В. Процессы и аппараты пищевых производств. [Электронный ресурс] / Т.В. Вобликова, С.Н. Шлыков, А.В. Пермяков. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2016. — 204 с
2. Алексеев, Г.В. Виртуальный лабораторный практикум по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств». [Электронный ресурс] / Г.В. Алексеев, И.И. Бриденко, Н.И. Лукин. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2011. — 144 с
3. Остриков А.Н. Процессы и аппараты пищевых производств: учебное пособие.-Электрон. дан. – СПб.: ГИОРД, 2012.-614 с.
4. Колосков С.П. Оборудование предприятий ферментной промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1969. – 383 с.
5. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ**



Таблица 1

## Физические свойства воды на линии насыщения

t	P	$\rho$	$c \cdot 10^{-3}$	$\lambda \cdot 10^2$	$a \cdot 10^7$	$\nu \cdot 10^6$	$\beta \cdot 10^4$	$\sigma \cdot 10^3$	Pr
0	1,01	999,9	4,21	55,0	1,32	1,789	0,63	75,5	13,67
10	1,01	999,7	4,19	57,5	1,37	1,306	0,70	74,1	9,52
20	1,01	998,2	4,19	60,0	1,43	1,006	1,82	72,6	7,02
30	1,01	995,7	4,18	61,8	1,49	0,805	3,21	71,2	5,42
40	1,01	992,2	4,18	63,5	1,53	0,659	3,87	69,6	4,31
50	1,01	988,1	4,18	64,7	1,57	0,556	4,49	68,6	3,54
60	1,01	983,2	4,18	66,0	1,61	0,478	5,11	66,1	2,98
70	1,01	977,8	4,19	66,7	1,63	0,415	5,70	64,3	2,55
80	1,01	971,8	4,20	67,5	1,66	0,365	6,32	62,6	2,21
90	1,01	965,3	4,21	68,0	1,68	0,326	6,95	60,70	1,95
100	1,01	958,4	4,22	68,2	1,69	0,295	7,52	58,8	1,75
110	1,43	951,0	4,23	68,5	1,70	0,272	8,08	56,9	1,60
120	1,99	943,1	4,25	68,5	1,71	0,225	8,64	54,8	1,47
130	2,69	934,8	4,27	68,5	1,72	0,233	9,19	52,9	1,36
140	3,61	926,1	4,29	68,5	1,73	0,217	9,72	50,7	1,26
150	4,75	917,0	4,32	68,5	1,73	0,203	10,3	48,8	1,17
160	6,17	907,4	4,35	67,4	1,73	0,191	10,7	46,6	1,10
170	7,91	897,8	4,38	67,9	1,73	0,181	11,3	44,3	1,05
180	10,03	886,9	4,42	67,5	1,73	0,173	11,9	42,3	1,00
190	12,55	878,0	4,46	67,0	1,72	0,165	12,6	40,0	0,96
200	15,52	863,0	4,51	66,3	1,72	0,158	13,3	37,6	0,93

Данные в таблице:

t - температура, °C;

с - удельная теплоемкость, Дж/кг·К;

а - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;β - коэффициент объемного расширения, К<sup>-1</sup>;

σ - коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

Р - давление, бар;

ρ - плотность, кг/м<sup>3</sup>;

Таблица 2

Насыщенный пар и вода на линии насыщения (по давлению)

P	t	$\rho_B$	$\rho_n$	$i'$	$i''$	r
0,04	28,98	995,9	0,02873	121,4	2554	2438
0,045	31,03	995,3	0,03211	130,0	2557	2427
0,050	38,88	994,7	0,03547	137,8	2561	2423
0,055	34,59	994,2	0,03880	144,9	2564	2419
0,060	36,18	993,6	0,04212	151,5	2567	2415
0,065	37,65	993,1	0,04542	157,7	2570	2412
0,070	39,03	992,5	0,04871	163,4	2572	2409
0,075	40,32	992,0	0,05198	168,8	2574	2405
0,080	41,54	991,5	0,05525	173,9	2576	2402
0,085	42,69	991,0	0,05849	178,7	2578	2399

Продолжение табл. 2

P	t	$\rho_B$	$\rho_n$	$i'$	$i''$	r
0,090	43,79	990,6	0,06172	183,3	2580	2397
0,095	44,84	990,2	0,06473	187,7	2582	2394
0,10	45,84	989,8	0,06812	191,9	2584	2392
0,11	47,72	989,0	0,07462	199,7	2586	2388
0,12	49,45	988,2	0,08097	207,0	2591	2384
0,13	51,07	987,5	0,08726	213,8	2594	2380
0,14	52,58	986,8	0,09354	220,1	2596	2376
0,15	54,00	986,1	0,09880	226,1	2599	2373
0,16	55,34	985,5	0,1060	236,9	2603	2366
0,17	56,61	984,9	0,1123	237,2	2604	2365
0,18	57,82	984,3	0,1185	241,9	2605	2363
0,19	58,98	983,7	0,1247	246,7	2607	2360
0,20	60,08	983,1	0,1308	251,4	2609	2358
0,21	61,14	982,5	0,1369	255,9	2611	2355
0,22	62,16	982,0	0,1430	260,2	2613	2353
0,23	63,14	981,5	0,1491	264,3	2614	2350
0,24	64,08	981,0	0,1551	268,2	2616	2348
0,25	64,99	980,5	0,1612	272,0	2618	2346
0,26	65,88	980,0	0,1673	275,7	22620	2344
0,27	66,73	979,5	0,1733	279,3	2621	2342
0,28	67,55	979,0	0,1793	282,7	2623	2430
0,29	68,35	978,5	0,1853	286,0	2624	2336

0,30	69,12	978,1	0,1913	289,3	2625	2336
0,32	70,60	977,3	0,2032	295,5	2627	2332
0,34	72,02	976,5	0,2151	301,5	2630	2338
0,36	73,36	975,8	0,2269	307,1	2632	2325
0,38	74,64	975,0	0,2387	312,5	2634	2322
0,40	75,88	974,2	0,2504	317,7	2636	2318
0,45	78,75	972,5	0,2797	329,6	2641	2311
0,50	81,35	970,9	0,3087	340,6	2645	2304
0,55	83,74	969,4	0,3375	350,7	2649	2298
0,60	85,95	968,0	0,3661	360,0	2653	2293
0,65	88,02	966,6	0,3946	368,6	2657	2288
0,70	89,87	965,3	0,4230	376,8	2660	2283
0,75	91,80	964,1	0,4512	384,5	2663	2278
0,80	93,52	962,9	0,4792	391,8	2665	2273
0,85	95,16	961,8	0,5071	398,7	2668	2269
0,90	96,72	960,7	0,5350	405,3	2670	2265

Продолжение табл. 2

P	t	$\rho_b$	$\rho_n$	$i'$	$i''$	r
0,95	98,21	959,6	0,5627	411,4	2673	2261
1,00	99,64	958,5	0,5903	417,4	2675	2258
1,1	102,32	956,7	0,6453	428,9	2679	2250
1,2	104,81	954,9	0,6999	439,4	2683	2244
1,3	107,14	953,2	0,7545	449,2	2667	2238
1,4	109,33	951,4	0,8080	458,5	2690	2232
1,5	111,38	949,9	0,8627	467,2	2693	2226
1,6	113,38	948,4	0,9164	475,4	2695	2221
1,7	115,17	947,0	0,9690	483,2	2699	2216
1,8	116,94	946,6	1,029	490,7	2702	2211
1,9	118,62	944,2	1,076	497,9	2704	2206
2,0	120,23	942,9	1,129	504,8	2707	2202
2,1	121,78	941,5	1,182	511,4	2709	2198
2,2	123,27	940,4	1,235	517,8	2711	2193
2,3	124,74	939,3	1,287	524,0	2713	2189
2,4	126,09	938,1	1,340	529,8	2715	2185
2,5	127,43	987,0	1,392	535,4	2717	2182
2,6	128,73	935,8	1,440	540,9	2719	2178
2,7	129,98	934,7	1,496	546,2	2721	2175
2,8	131,2	933,7	1,548	551,4	2722	2171
2,9	132,39	932,7	1,599	551,5	2724	2167
3,0	133,54	931,7	1,651	561,4	2725	2164

3,1	134,66	930,7	1,703	566,3	2727	2161
3,2	135,75	929,8	1,754	571,1	2728	2157
3,3	135,82	928,8	1,805	575,7	2730	2154
3,4	137,86	927,9	1,857	580,2	2731	2151
3,5	138,89	927,0	1,908	584,5	2732	2148
3,6	139,87	926,1	1,959	588,7	2734	2145
3,7	140,84	925,2	2,010	592,8	2735	2141
3,8	141,79	924,4	2,061	596,8	2736	2139
3,9	142,71	923,6	2,112	600,8	2737	2136
4,0	143,62	922,8	2,163	604,7	2738	2133
4,1	144,51	922,0	2,213	608,5	2740	2131
4,2	145,39	921,2	2,264	612,3	2741	2129
4,3	146,25	920,4	2,315	616,1	2742	2126
4,4	147,09	919,6	2,366	619,8	2743	2123
4,5	147,92	918,8	2,416	623,4	2744	2121
4,6	148,73	918,5	2,467	626,9	2755	2118

Окончание табл. 2

P	t	$\rho_{\text{в}}$	$\rho_{\text{н}}$	$i'$	$i''$	r
4,7	149,53	917,3	2,517	630,3	2746	2116
4,8	150,31	916,5	2,568	633,7	2747	2113
4,9	151,08	915,8	2,618	636,9	2748	2111
5,0	151,84	915,1	2,669	640,1	2749	2109
5,2	153,32	913,7	2,769	646,5	2750	2104
5,4	154,76	912,4	2,869	625,7	2752	2099
5,6	156,16	911,0	2,969	658,8	2764	2095
5,8	157,52	909,7	3,069	664,7	2755	2090
6,0	158,84	908,5	3,169	670,5	2757	2086
6,2	160,12	907,2	3,268	667,0	2758	2086
6,4	161,37	906,0	3,367	681,5	2760	2078
6,6	162,59	904,8	3,467	686,9	2761	2074
6,8	163,39	903,6	3,566	692,1	2762	2070
7,0	164,96	902,4	3,666	697,2	2764	2067
7,2	166,10	901,2	3,765	702,2	2765	2063
7,4	167,21	900,1	3,864	707,1	2766	2059
7,6	168,30	899,0	3,968	711,8	2767	2055

Данные в таблице:

P - абсолютное давление, бар;

t - температура, °C;

 $\rho_{\text{в}}$  - плотность кипящей воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_n$  - плотность сухого насыщенного пара, кг/м<sup>3</sup>;  
 $i'$  - энтальпия кипящей воды, кДж/кг;  
 $i''$  - энтальпия сухого насыщенного пара, кДж/кг;  
 $g$  - скрытая теплота парообразования, кДж/кг.

Ориентировочные значения коэффициентов теплоотдачи (в Вт/(м<sup>2</sup> К))

Вид теплопередачи	Вода	Воздух ( $\rho_{абс}$ см 0,1 МПа)	Примечание
Вынужденное турбулентное течение:			
а) в трубах и каналах	1200 - 5800	35 - 60	d = 30 мм. Приведенные значения $\alpha$ соответствуют скоростям : воды – от 0,2 до 1,5 м/с, воздуха – 8 – 15 м/с.
б) при поперечном обтекании труб	3100 – 10000	70 – 100	Шахматный пучок $\epsilon_{\phi} = 1$
Свободное движение	250 – 500	3 - 9	Давление атмосферное. Значения $\alpha$ соответствует $\Delta t = 5-15$ К
Кипение воды	2000 - 24000		
Конденсация насыщенного горячего пара на наружной поверхности трубы	6500 - 15000		Давление насыщенного пара ( $\rho_{абс}$ 0,4 МПа) d = 30 мм. Значения $\alpha$ соответствует $\Delta t = 35-5$ К

# Ориентировочные значения коэффициентов теплопередачи [в Вт/(м<sup>2</sup> · К)]

Вид теплообмена	Вынужденное движение	Свободное движение
От газа к газу (при невысоких давлениях)	10—40	4—12
От газа к жидкости (газовые холодильники)	10—60	6—20
От конденсирующегося пара к газу (воздухоподогреватели)	10—60	6—12
От жидкости к жидкости (вода)	800—1700	140—340
От жидкости к жидкости (углеводороды, масла)	120—270	30—60
От конденсирующегося пара к воде (конденсаторы, подогреватели)	800—3500	300—1200
От конденсирующегося пара к органическим жидкостям (подогреватели)	120—340	60—170
От конденсирующегося пара органических веществ к воде (конденсаторы)	300—800	230—460
От конденсирующегося пара к кипящей жидкости (испарители)	—	300—2500

## Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от температуры

Пересчет в СИ: 1 кгс/см<sup>2</sup> = 9,81 · 10<sup>4</sup> Па.

Температура °С	Давление (абсолютное), кгс/см <sup>2</sup>	Удельный объем, м <sup>3</sup> /кг	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная энтальпия жидкости $i'$ , кДж/кг	Удельная энтальпия пара $i''$ , кДж/кг	Удельная теплота парообразова- ния $r$ , кДж/кг
0	0,0062	206,5	0,00484	0	2493,1	2493,1
5	0,0089	147,1	0,00680	20,95	2502,7	2481,7
10	0,0125	106,4	0,00940	41,90	2512,3	2470,4
15	0,0174	77,9	0,01283	62,85	2522,4	2459,5
20	0,0238	57,8	0,01729	83,80	2532,0	2448,2
25	0,0323	43,40	0,02304	104,75	2541,7	2436,9
30	0,0433	32,93	0,03036	125,70	2551,3	2425,6
35	0,0573	25,25	0,03960	146,65	2561,0	2414,3
40	0,0752	19,55	0,05114	167,60	2570,6	2403,0
45	0,0977	15,28	0,06543	188,55	2579,8	2391,3
50	0,1258	12,054	0,0830	209,50	2589,5	2380,0
55	0,1605	9,589	0,1043	230,45	2598,7	2368,2
60	0,2031	7,687	0,1301	251,40	2608,3	2356,9
65	0,2550	6,209	0,1611	272,35	2617,5	2345,2
70	0,3177	5,052	0,1979	293,30	2626,3	2333,0
75	0,393	4,139	0,2416	314,3	2636	2321
80	0,483	3,414	0,2929	335,2	2644	2310
85	0,590	2,832	0,3531	356,2	2653	2297
90	0,715	2,365	0,4229	377,1	2662	2285
95	0,862	1,985	0,5039	398,1	2671	2273
100	1,033	1,675	0,5970	419,0	2679	2260
105	1,232	1,421	0,7036	440,4	2687	2248
110	1,461	1,212	0,8254	461,3	2696	2234
115	1,724	1,038	0,9635	482,7	2704	2221
120	2,025	0,893	1,1199	504,1	2711	2207
125	2,367	0,7715	1,296	525,4	2718	2194

Температура, °С	Давление (абсолютное), кгс/см²	Удельный объем, м³/кг	Плотность, кг/м³	Удельная энтальпия жидкости $i'$ , кДж/кг	Удельная энтальпия пара $i''$ , кДж/кг	Удельная теплота парообразования $r$ , кДж/кг
130	2,755	0,6693	1,494	546,8	2726	2179
135	3,192	0,5831	1,715	568,2	2733	2165
140	3,685	0,5096	1,962	589,5	2740	2150
145	4,238	0,4469	2,238	611,3	2747	2125
150	4,855	0,3933	2,543	632,7	2753	2120
160	6,303	0,3075	3,252	654,1	2765	2089
170	8,080	0,2431	4,113	719,8	2776	2056
180	10,23	0,1944	5,145	763,8	2785	2021
190	12,80	0,1568	6,378	808,3	2792	1984
200	15,85	0,1276	7,840	852,7	2798	1945
210	19,51	0,1045	9,567	897,9	2801	1904
220	23,66	0,0862	11,600	943,2	2803	1860
230	28,53	0,07155	13,98	989,3	2802	1813
240	34,13	0,05967	16,76	1035	2799	1763
250	40,55	0,04998	20,01	1082	2792	1710
260	47,85	0,04199	23,82	1130	2783	1653
270	56,11	0,03538	28,27	1178	2770	1593
280	65,42	0,02988	33,47	1226	2754	1528
290	75,88	0,02525	39,60	1275	2734	1459
300	87,6	0,02131	46,93	1327	2710	1384
310	100,7	0,01799	55,59	1380	2682	1302
320	115,2	0,01516	65,95	1437	2650	1213
330	131,3	0,01273	78,53	1498	2613	1117
340	149,0	0,01064	93,98	1564	2571	1009
350	168,6	0,00884	113,2	1638	2519	881,2
360	190,3	0,00716	139,6	1730	2444	713,6
370	214,5	0,00585	171,0	1890	2304	411,5
374	225	0,00310	322,6	2100	2100	0

