

В.Н.Исаев

РАСЧЕТ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА
ПАСТЕРИЗАЦИОННО-ОХЛАДИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Учебное пособие

Иваново

2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Ивановский государственный химико-технологический университет

В.Н. Исаев

РАСЧЕТ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА
ПАСТЕРИЗАЦИОННО-ОХЛАДИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Учебное пособие

Под редакцией А.Г. Липина

Иваново 2019

УДК 66.025

Исаев В.Н. Расчет пластинчатого теплообменника пастеризационно-охладительных установок: учеб. пособие / В.Н. Исаев; под. ред. А.Г. Липина; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.- Иваново, 2019. – 64с.

В учебном пособии рассмотрена типовая схема пастеризационно-охладительной установки; показаны и описаны конструктивные элементы основного аппарата – пластинчатого теплообменника; изложен его расчет. В приложении приведены схемы и техническая характеристика пластинчатых теплообменников пастеризационно-охладительных установок.

Предназначено студентам технологических специальностей ИГХТУ при выполнении курсового проекта по дисциплине “Процессы и аппараты пищевых производств”.

Табл.16. Ил. 18. Библиогр.: 7 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензенты:

кафедра энергетики, теплотехнологий и газоснабжения Ивановского государственного энергетического университета;

доктор технических наук, профессор Е.П. Пантелеев (Ивановский государственный энергетический университет).

© Исаев В.Н., 2019

© ФГБОУ ВО “Ивановский

государственный химико-

технологический университет”, 2019

Оглавление

1.Некоторые сведения о пастеризационно-охладительных установках	4
2.Пример расчета четырех секционной установки	12
2.1.Тепловые балансы; определение необходимых начальных и конечных температур теплоносителей; расчет тепловой нагрузки	14
2.2.Определение средних температурных напоров	17
2.3.Выбор скоростей движения продукта и теплоносителей	18
2.4.Расчет режимов движения жидкостей	19
2.5.Определение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи	22
2.6.Расчет поверхности теплообмена, числа пластин и пакетов в установке. Компоновка секций	25
2.7.Определение гидравлического сопротивления	33
2.8.Определение основных габаритных размеров пластинчатого теплообменного аппарата	35
Список библиографических источников	40
Приложение	41

1. Некоторые сведения о пастеризационно-охладительных установках

Типовая пастеризационно-охладительная установка (на примере ОПЖ-5; ОПЖ-10), предназначенная для стерилизации продукта (молока), представлена на рис.1.

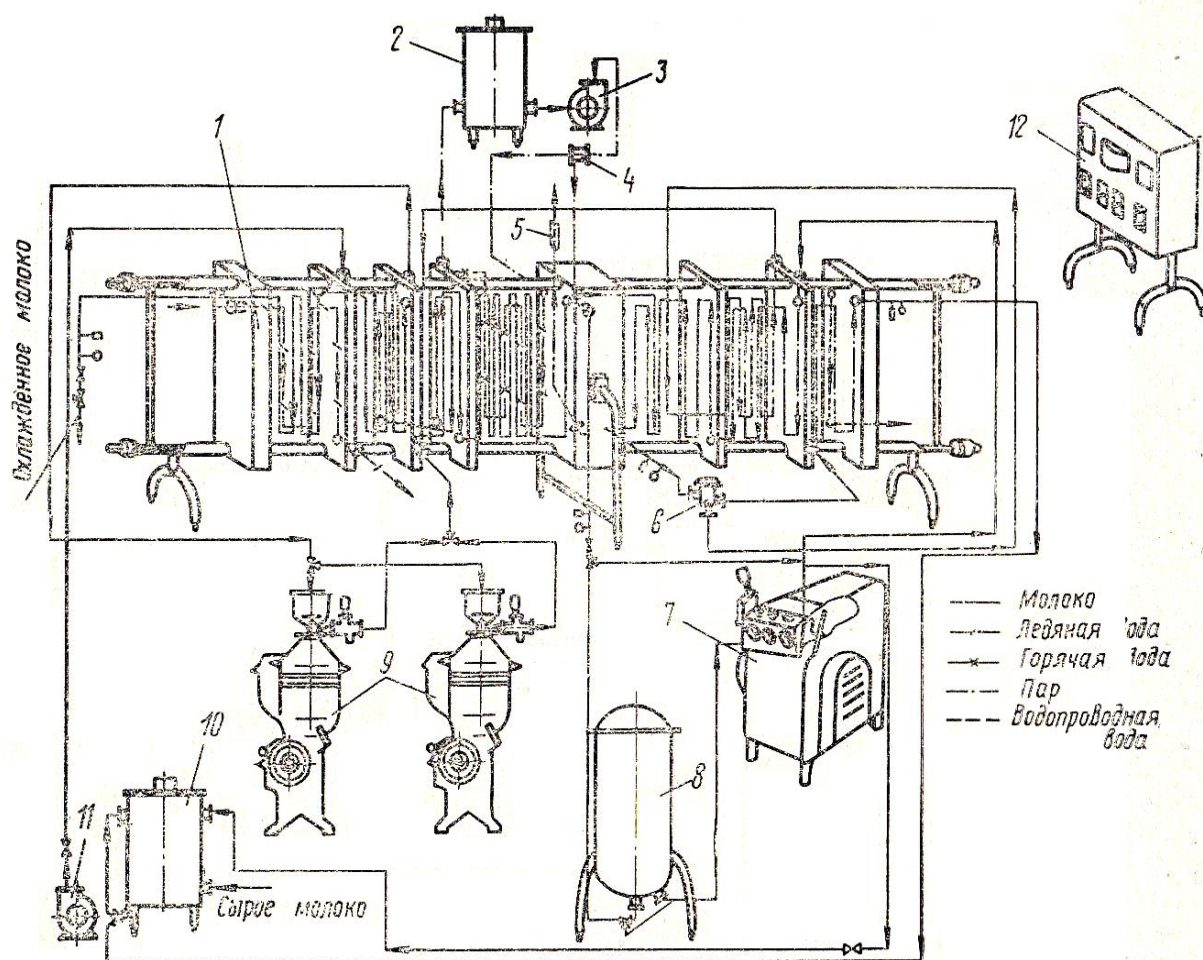


Рис.1. Основное оборудование пастеризационно-охладительной установки: 1-пластинчатый теплообменник; 2-бойлер горячей воды; 3,11-насосы; 4-инжектор; 5-регулятор потока; 6-перепускной клапан; 7-гомогенизатор; 8-выдерживатель; 9-сепараторы; 10-уравнительный бак; 12-панель управления

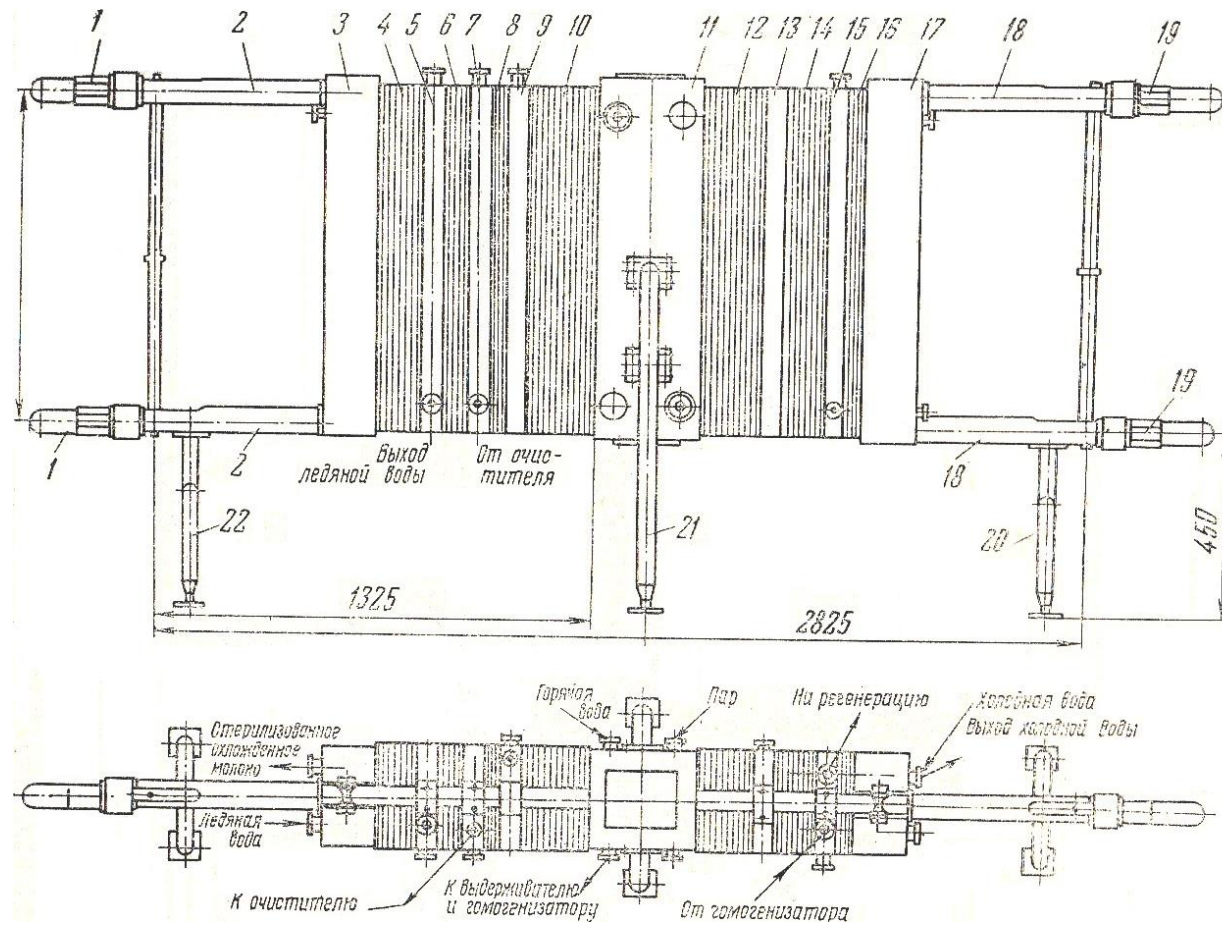


Рис.2. Узлы и детали пластинчатого теплообменника: 1,19-зажимные механизмы; 2,18-штанги; 3,17-нажимные плиты; 4,16-пластины секций охлаждения ледяной и водопроводной водой; 5,7,9,13,15-межсекционные плиты; 6,8,14-пластины секций регенерации I,II,III соответственно; 10,12-пластины секций пастеризации и стерилизации; 11-опорная плита (стойка); 20,21,22-опоры

Основным элементом такой установки является пластинчатый теплообменник, который состоит из унифицированных узлов и деталей (рис.3,4,5) [1-2].

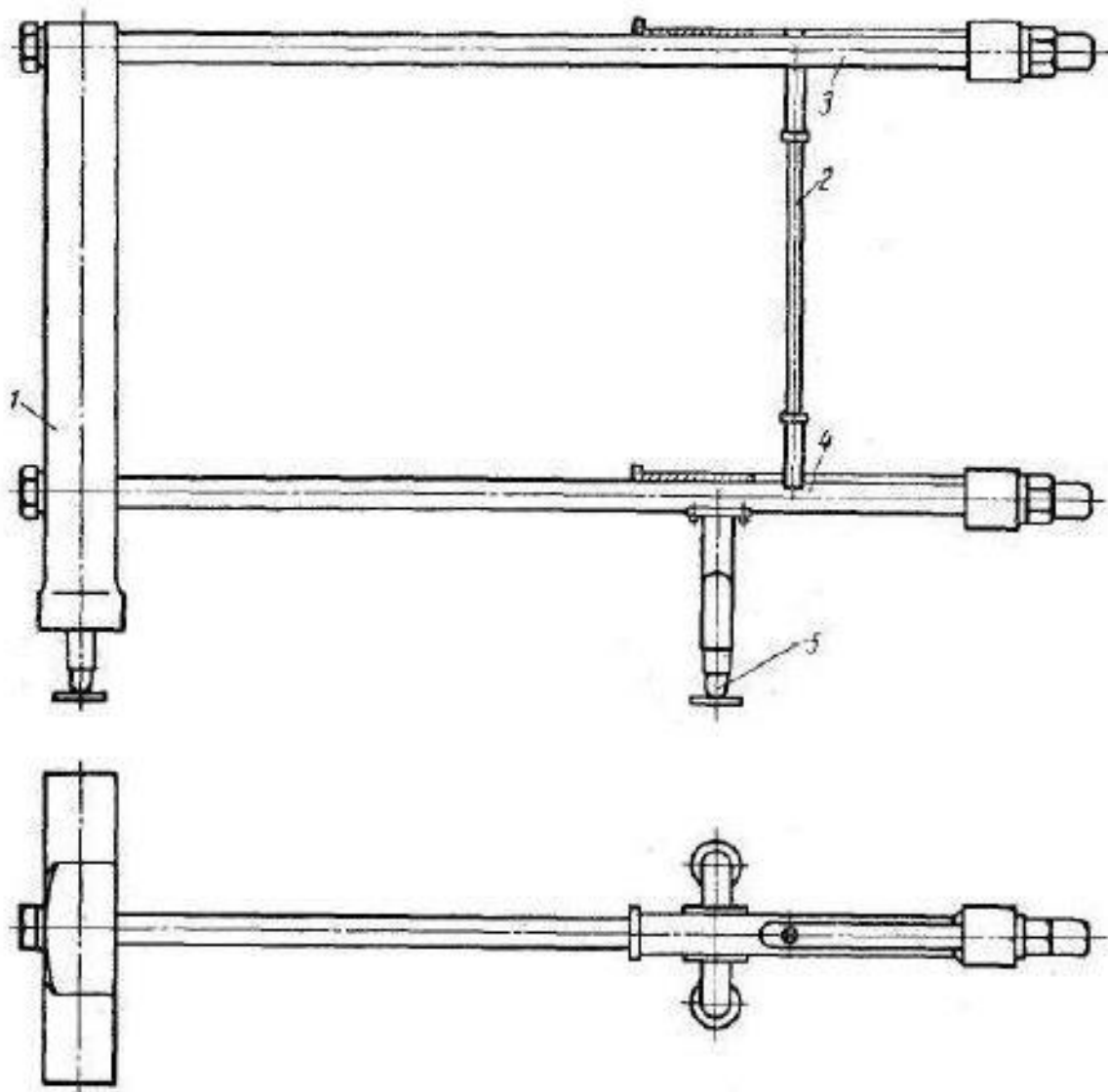


Рис.3. Рама пластинчатого теплообменника: 1 – опорная плита (стойка); 2 – распорка; 3,4 – верхняя и нижняя штанга с накладками; 5 – опора; 6 – зажимной механизм

Опорная плита воспринимает основную нагрузку, обеспечивающую герметизацию аппарата путем деформации уплотнительных прокладок пластин с помощью зажимных механизмов. Усилие затяжки зажимных механизмов (3000÷4000 Н/м) непосредственно передается на нажимную плиту с помощью

подвижных накладок, скользящих по наружной поверхности штанг. Распорка 2 предотвращает их консольное провисание. Многосекционные теплообменники для отделения секций имеют межсекционные плиты, которые представляют собой прямоугольные решетки, снабженные проходниками и угловыми штуцерами.

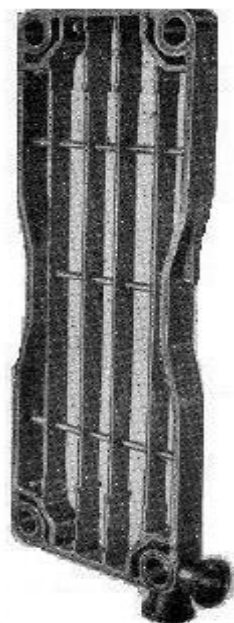


Рис.4. Межсекционная плита

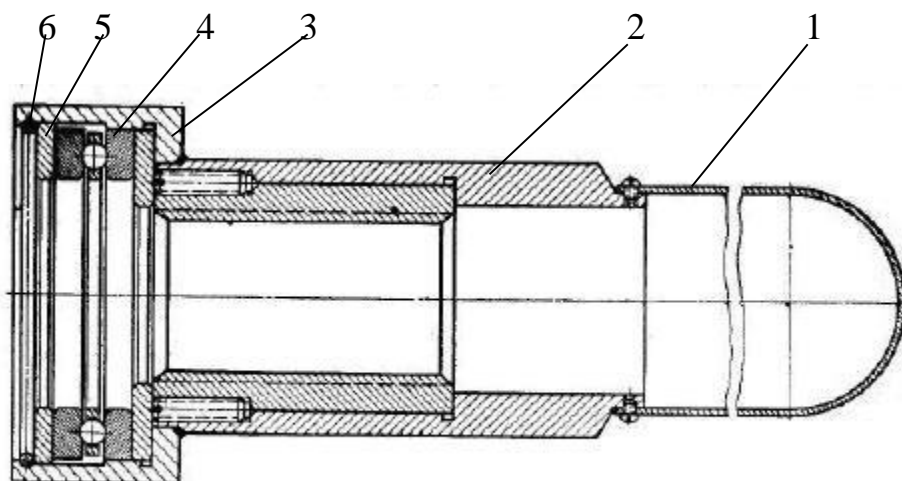


Рис.5. Зажимной механизм: 1- колпачок; 2 – гайка; 3 – корпус подшипника; 4 – радиальный подшипник; 5 – стопорное кольцо; 6 – пружинное кольцо

Между плитами пластинчатого аппарата располагаются пластины, которые по назначению делятся на рядовые, граничные, концевые. Устройство наиболее распространенной рядовой однопоточной пластины (П-2) показано на рис.6.

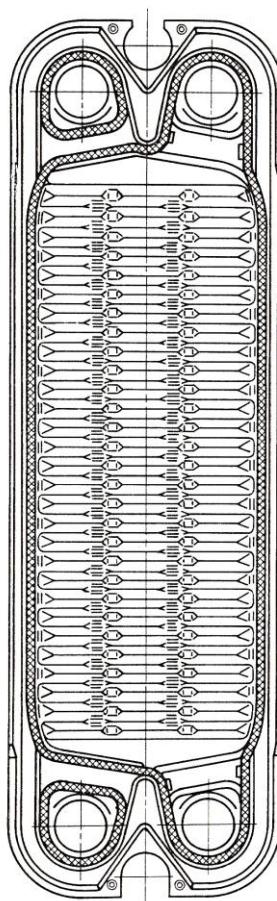


Рис.6. Рядовая пластина (П-2)

Цельноштампованная пластина из листовой нержавеющей стали имеет гофрированную поверхность и четыре угловых отверстия с прокладками. Два угловых отверстия (на рис.6 слева) имеют кольцевые прокладки, два других (справа) имеют прокладку в виде шнура постоянного сечения, которая ограждает рабочую поверхность пластины от контакта с другой жидкостью. В сжатом состоянии такие пластины образуют два продольных коллекторных канала в аппарате: по одному коллекторному каналу движется продукт, по

другому - теплоноситель. В результате этого, при движении жидкости в межпластинном канале с одной стороны пластины она будет обогреваться (или охлаждаться) теплоносителем с другой стороны.

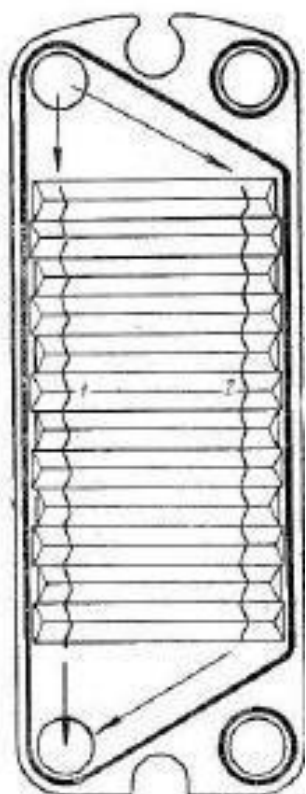
Граничные пластины имеют неполное количество угловых отверстий и их устанавливают в местах, где необходимо обеспечить поворот потока, т.е. на границах пакетов. Под пакетом понимают комплект пластин, в котором жидкость движется в одном направлении.

Рядовые и граничные пластины имеют гофрированную поверхность и обеспечивают тепловую нагрузку аппарата. Их количество определяют расчетным путем и распределяют в теплообменнике таким образом, чтобы общее количество каналов со стороны продукта и рабочей жидкости совпадало (компоновка аппарата). Формулу компоновки условно обозначают дробью. В ее числителе стоит сумма цифр, количество которых показывает число последовательно соединенных пакетов по тракту продукта, а значение каждой из цифр – количество параллельных каналов в пакете. В знаменателе – все аналогично, но для теплоносителя.

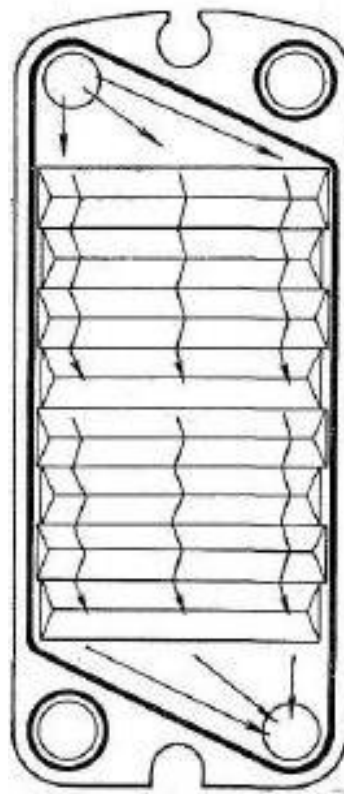
Концевые пластины размещаются по концам секций и непосредственно примыкают к межсекционным, опорным и нажимным плитам. Именно по - этому эти пластины имеют одну сторону гладкую, а другую гофрированную, омываемую продуктом или рабочей жидкостью.

Кроме того, по направлению движения потока на пластине различают прямоточные пластины и пластины с диагональным током (рис.7). В качестве материала для изготовления пластин используют стали 1X18H9, 1X18H9T для пищевых сред; для кислых сред – X18H12M2T.

В зависимости от компоновки, аппараты для тепловой обработки пищевых продуктов по назначению делятся: на нагреватели (класс Н), охладители (класс О), комбинированные для пастеризации и охлаждения (класс П).



а)



б)

Рис.7. Прямоточная пластина (а) и пластина с диагональным током (б)

В нагревательных пастеризационных установках проводят пастеризацию продукта. Пластинчатый теплообменник такой установки обычно имеет секции регенерации и пастеризации

В охладительных установках осуществляют охлаждение продуктов для обеспечения его длительного хранения. Пластинчатый теплообменник установки в этом случае включает в себя секции водяного, рассольного, водяного и рассольного охлаждения.

В комбинированных пастеризационно-охладительных установках проводится комплексная обработка продукта, и теплообменник такой установки содержит

все выше перечисленные секции: регенерации, пастеризации, водяного и рассольного охлаждения.

В отдельную группу выделяют пластинчатые аппараты пастеризационно-охладительных установок при производстве стерилизованных продуктов. Эти установки (ОПЖ-5, ОПЖ-10) имеют дополнительную секцию для кратковременной высокотемпературной обработки пищевых продуктов паром – секцию стерилизации.

Принцип работы пастеризационно-охладительной установки на рис.1 (на примере молока) заключается в следующем. Сырое молоко из уравнильного бака 10 насосом 11 подается в I секцию регенерации пластинчатого теплообменника для предварительного подогрева. Подогретый продукт поступает в сепараторы молокоочистителей 9 и после очистки подается ими во II секцию регенерации, а затем в секцию пастеризации. Пастеризованное молоко направляется в выдерживатель 8 и гомогенизатор 7. Пастеризация осуществляется путем циркуляции горячей воды насосом 3 через бойлер 2 и паровой инжектор 4. После гомогенизации молоко направляется в III секцию регенерации и из нее в секцию стерилизации, где молоко кратковременно нагревается паром при температуре 135-140 °С. Стерилизованное молоко направляется на охлаждение в секции регенерации III, II, I, а затем в секцию водяного охлаждения I (крайняя правая часть пластинчатого аппарата). Из этой секции осуществляется розлив охлажденного стерилизованного продукта.

В случае падения температуры в секции стерилизации ниже температуры 135 °С автоматически срабатывает перепускной клапан 6 и молоко направляется в секцию охлаждения ледяной водой II (крайняя левая часть установки). Затем охлажденное молоко из этой секции поступает вновь в уравнильный бак 10 для повторной стерилизации. Узлы и детали пластинчатого аппарата представлены на рис.2.

2. Пример расчета четырех секционной установки

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Параметры	Значение параметра
Производительность, кг/час	$G_{\text{п}}=5000$
Расход горячей воды, кг/час	$G_{\text{г.в}}=20000$
Расход холодной воды, кг/час	$G_{\text{х.в}}=15000$
Расход рассола (25,% раствор NaCl), кг/час	$G_{\text{р}}=10000$
Начальная температура молока, °С	$t_1=12$
Температура пастеризации, °С	$t_3=72$
Температура молока после секции водяного охлаждения, °С	$t_5=10$
Температура охлажденного продукта, °С	$t_6=3$
Начальная температура горячей воды, °С	$t_{\text{г.в}}^{\text{н}}=74$
Начальная температура холодной воды, °С	$t_{\text{х.в}}^{\text{н}}=6$
Начальная температура рассола, °С	$t_{\text{р}}^{\text{н}}=-4$
Коэффициент регенерации теплоты	$\varepsilon=0,8$
Тип пластин	П-2
Рабочая поверхность пластины, м ²	$f=0,2$

Зазор между пластинами, м	$h=0,0028$
Ширина проточной части, м	$b=0,27$
Толщина пластины, м	$\delta_{ст}=0,0012$

Порядок расчета. Намечают тепловую схему комбинированного теплообменника, состоящего из четырех секций: регенерации (I), пастеризации (II), водяного (III) и рассольного (IV) охлаждения. Условная схема изменения температур теплоносителей для каждой секции аппарата представлена на рис.8.

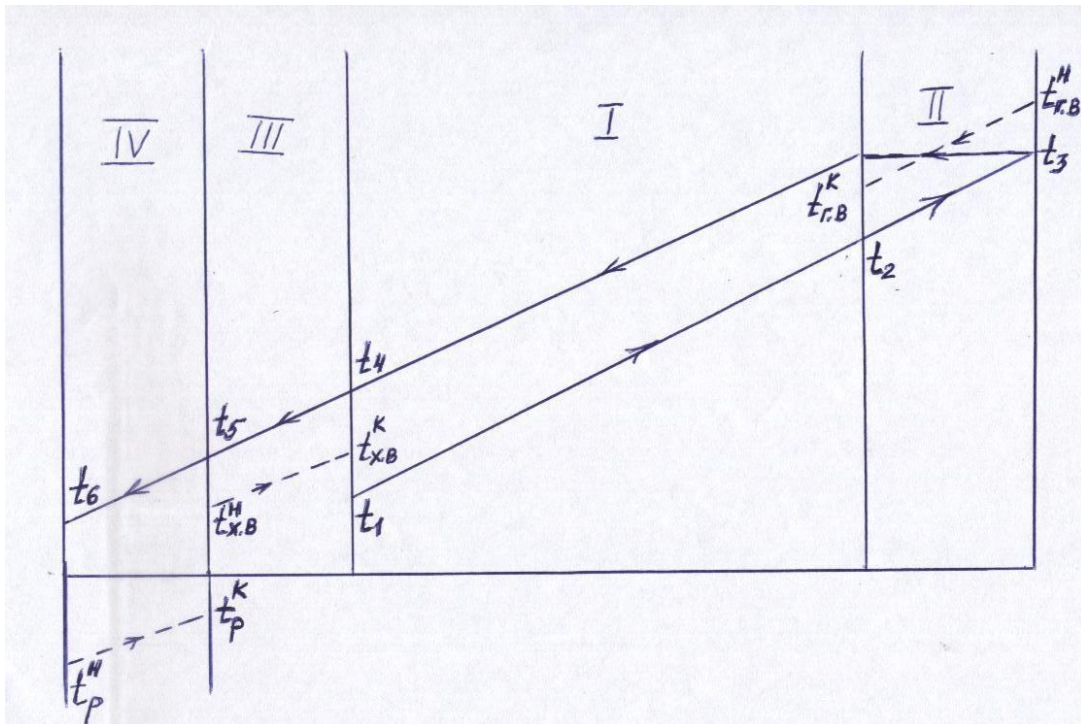


Рис.8. Схема изменения температур теплоносителей четырехсекционного теплообменника: а) сплошная линия - профиль изменения температуры продукта; б) пунктирная профиль - изменения температур рабочих жидкостей (горячей и холодной воды, рассола)

2.1. Тепловые балансы; определение необходимых начальных и конечных температур теплоносителей; расчет тепловой нагрузки

Секция регенерации (I). Уравнение теплового баланса:

$$G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} (t_2 - t_1) = G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} (t_3 - t_4) = Q_{\text{рег}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{рег}}$ – тепловая нагрузка секции регенерации, Вт; $G_{\text{п}}$ – массовый расход продукта (производительность установки), кг/с; $C_{\text{п}}$ – теплоемкость продукта, выбирается по справочникам при средней температуре, Дж/(кгК); t_1, t_2 – температура сырого продукта на входе и выходе из секции пастеризации; t_3, t_4 – температура пастеризации и температура пастеризованного продукта на выходе из секции пастеризации соответственно, °С.

Эффективность работы секции регенерации характеризуется коэффициентом регенерации ε , представляющим собой отношение теплового потока $Q_{\text{рег}}$, переданному продукту в зоне регенерации, к общему потоку теплоты Q_0 , затраченному на нагревание продукта от начальной температуры t_1 до температуры пастеризации t_3 :

$$\varepsilon = \frac{G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} (t_2 - t_1)}{G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} (t_3 - t_1)}. \quad (2)$$

Из уравнения (2), пренебрегая незначительным изменением теплоемкости продукта $C_{\text{п}}$, определяют температуру продукта после секции регенерации t_2 , °С:

$$t_2 = t_1 + \varepsilon(t_3 - t_1) = 12 + 0,8(72 - 12) = 60. \quad (3)$$

Температура пастеризованного продукта после секции регенерации из уравнения (1), °С:

$$t_4 = t_3 - (t_2 - t_1) = 72 - (60 - 12) = 24. \quad (4)$$

Тепловая нагрузка секции регенерации $Q_{\text{рег}}$, Вт:

$$Q_{\text{рег}} = G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} (t_2 - t_1) = \frac{5000}{3600} \cdot 3926(60 - 12) = 261733. \quad (5)$$

Секция пастеризации (II). Уравнение теплового баланса:

$$G_{\text{г.в}} \cdot C_{\text{с.в}} (t_{\text{г.в}}^{\text{H}} - t_{\text{г.в}}^{\text{K}}) = G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} (t_3 - t_2) = Q_{\text{п}}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{п}}$ – тепловая нагрузка секции пастеризации, Вт; $G_{\text{г.в}}$ – массовый расход горячей воды, кг/с; $C_{\text{г.в}}$ – теплоемкость горячей воды, выбирается по справочникам при средней температуре, Дж/(кгК); $t_{\text{г.в}}^{\text{H}}, t_{\text{г.в}}^{\text{K}}$ – начальная и конечная температура горячей воды, °С; t_3, t_2 – температура пастеризации и температура подогретого продукта на выходе из секции регенерации соответственно, °С.

Из уравнения (6) определяют температуру горячей воды на выходе из секции пастеризации:

$$t_{\text{г.в}}^{\text{K}} = t_{\text{г.в}}^{\text{H}} - \frac{G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}}}{G_{\text{г.в}} \cdot C_{\text{г.в}}} (t_3 - t_2) = 74 - \frac{5000 \cdot 3855}{20000 \cdot 4215} (72 - 60) = 71,2^{\circ}\text{C}. \quad (7)$$

Тепловая нагрузка секции $Q_{\text{п}}$, Вт:

$$Q_{\text{п}} = G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} (t_3 - t_2) = \frac{5000}{3600} 3855(72 - 60) = 64250. \quad (8)$$

Секция водяного охлаждения (III). Уравнение теплового баланса:

$$G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} (t_4 - t_5) = G_{\text{х.в}} \cdot C_{\text{х.в}} (t_{\text{х.в}}^{\text{K}} - t_{\text{х.в}}^{\text{H}}) = Q_{\text{в.ох}}, \quad (9)$$

где $Q_{\text{в.ох}}$ – тепловая нагрузка секции водяного охлаждения, Вт; $G_{\text{х.в}}$ – массовый расход холодной воды, кг/с; $C_{\text{х.в}}$ – теплоемкость холодной воды, выбирается по справочникам при средней температуре, Дж/(кгК); $t_{\text{х.в}}^{\text{H}}, t_{\text{х.в}}^{\text{K}}$ – начальная и

конечная температура холодной воды, $^{\circ}\text{C}$; t_4, t_5 – температура продукта на входе и выходе из секции водяного охлаждения соответственно, $^{\circ}\text{C}$.

Исходя из принципа равномерного распределения тепловой нагрузки между секциями водяного и рассольного охлаждения, температуру t_5 можно определить следующим образом:

$$t_5 = \frac{t_4 + t_6}{2} \text{ } ^{\circ}\text{C}. \quad (10)$$

Тогда конечная температура холодной воды на выходе из секции водяного охлаждения равна, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_{\text{х.в}}^{\text{к}} = t_{\text{х.в}}^{\text{н}} + \frac{G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}}}{G_{\text{х.в}} \cdot C_{\text{х.в}}} (t_4 - t_5) = 6 + \frac{5000 \cdot 3910}{15000 \cdot 4220} (24 - 10) = 10,3. \quad (11)$$

Тепловая нагрузка секции водяного охлаждения $Q_{\text{в.ох}}$, Вт:

$$Q_{\text{в.ох}} = G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} (t_4 - t_5) = \frac{5000}{3600} \cdot 3910 (24 - 10) = 76028. \quad (12)$$

Секция рассольного охлаждения (IV). Уравнение теплового баланса:

$$G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} (t_5 - t_6) = G_{\text{р}} \cdot C_{\text{р}} (t_{\text{р}}^{\text{к}} - t_{\text{р}}^{\text{н}}) = Q_{\text{р.ох}}, \quad (13)$$

где $Q_{\text{в.ох}}$ – тепловая нагрузка секции рассольного охлаждения, Вт; $G_{\text{р}}$ – массовый расход рассола, кг/с; $C_{\text{р}}$ – теплоемкость рассола, выбирается по справочникам при средней температуре [4], Дж/(кгК); $t_{\text{р}}^{\text{н}}, t_{\text{р}}^{\text{к}}$ – начальная и конечная температура рассола, $^{\circ}\text{C}$; t_5, t_6 – температура продукта на входе и выходе из секции рассольного охлаждения соответственно, $^{\circ}\text{C}$.

Конечная температура рассола на выходе из секции равна, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_{\text{р}}^{\text{к}} = t_{\text{р}}^{\text{н}} + \frac{G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}}}{G_{\text{р}} \cdot C_{\text{р}}} (t_5 - t_6) = -4 + \frac{5000 \cdot 3875}{10000 \cdot 3344} (10 - 3) = 0,06. \quad (14)$$

Принимаем $t_p^k = 0^\circ\text{C}$.

Тепловая нагрузка секции рассольного охлаждения $Q_{p.ox}$, Вт:

$$Q_{p.ox} = G_{п} \cdot C_{п} (t_5 - t_6) = \frac{5000}{3600} \cdot 3876(10 - 3) = 37683. \quad (15)$$

2.2. Определение средних температурных напоров (движущих сил по секциям теплообменного аппарата)

Определение средних температурных напоров для каждой секции аппарата проводят по температурной схеме на рис.8 в зависимости от отношения большей разницы температур Δt_6 к меньшей Δt_m :

$$\text{если } \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} \leq 2, \quad \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_m}{2}; \quad (16)$$

$$\text{если } \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} > 2, \quad \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}. \quad (17)$$

Секция регенерации теплоты. Так как для этой секции температурные напоры на входе Δt_1 и на выходе Δt_2 одинаковы

$$\Delta t_1 = t_4 - t_1 = 24 - 12 = 12; \quad (18)$$

$$\Delta t_2 = t_3 - t_2 = 72 - 60 = 12, \quad (19)$$

то средний температурный напор $\Delta t_{cp}^{per} = 12^\circ\text{C}$.

Секция пастеризации.

$$\Delta t_6 = t_{г.в}^k - t_2 = 71,2 - 60 = 11,2; \quad (20)$$

$$\Delta t_M = t_{Г.В}^H - t_3 = 74 - 72 = 2; \quad (21)$$

$$\frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} > 2, \quad \Delta t_{cp}^n = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}} = \frac{11,2 - 2}{\ln \frac{11,2}{2}} = 5,3. \quad (22)$$

Секция водяного охлаждения.

$$\Delta t_6 = t_4 - t_{Х.В}^K = 24 - 10,3 = 13,7; \quad (23)$$

$$\Delta t_M = t_5 - t_{Х.В}^H = 10 - 6 = 4; \quad (24)$$

$$\frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} > 2, \quad \Delta t_{cp}^{B.ox} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}} = \frac{13,7 - 4}{\ln \frac{13,7}{4}} = 7,9. \quad (25)$$

Секция рассольного охлаждения.

$$\Delta t_6 = t_5 - t_p^K = 10 - 0 = 10; \quad (26)$$

$$\Delta t_M = t_6 - t_p^H = 3 - (-4) = 7; \quad (27)$$

$$\frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} < 2, \quad \Delta t_{cp}^{p.ox} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_M}{2} = \frac{10 + 7}{2} = 8,5. \quad (28)$$

2.3. Выбор скоростей движения продукта и теплоносителей

При заданной производительности аппарата и выбранном типе пластин скорость продукта и компоновка секций теплообменника по тракту движения продукта (число пакетов и параллельных каналов них) связаны друг с другом, т.е. выбор одного из этих параметров определяет значения другого.

Ввиду того, что аппарат состоит из четырех секций и должен обладать высоким коэффициентом регенерации теплоты и соответственно большей

секцией регенерации, полагают, что общее число пакетов в теплообменнике и потери давления по линии движения продукта будут значительными. Поэтому скорость движения продукта в каналах между пластинами, как правило, может быть небольшой и отличается от скоростей движения рабочих жидкостей. Значение этих скоростей для ряда многосекционных теплообменников приведено в приложении и зависит от типа и назначения аппарата. В случае отсутствия таких данных скорость движения продукта можно принять в пределах $(0,25 \div 0,35)$ м/с; для рабочих жидкостей – равной или удвоенной скорости движения продукта. Ориентироваться об ожидаемом сопротивлении секций теплообменника можно по тепловой нагрузке.

Принимаем скорость движения продукта $W_{\Pi}=0,25$ м/с; скорость горячей воды и рассола $W_{г.в}=W_p=2 \cdot W_{\Pi}=2 \cdot 0,25=0,5$ м/с; скорость холодной воды $W_{х.в}= W_{\Pi}=0,25$ м/с.

2.4. Расчет режимов движения жидкостей

Секция регенерации.

При средней температуре продукта в секции со стороны нагревания, $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{ср}}^{\text{п.н}} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{12 + 60}{2} = 36 \quad (29)$$

Теплопроводность (λ), динамическая вязкость (μ), плотность (ρ), теплоемкость (C) и критерий Прандтля (Pr) соответственно равны [1,2]: $\lambda=0,503$ Вт/(м·К); $\mu=1,225 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\rho=1023$ кг/м³; $C=3905$ Дж/(кг·К); $Pr=9,55$.

Режим движения при этих физических параметрах

$$Re = \frac{W_{\text{п}} \rho d_3}{\mu} = \frac{0,26 \cdot 1023 \cdot 0,0056}{1,225 \cdot 10^{-3}} = 1216, \quad (30)$$

где $d_3=2h=2 \cdot 0,0028=0,0056$ м, эквивалентный диаметр канала.

Для пастеризованного продукта со стороны охлаждения средняя температура равна, $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{cp}}^{\text{п,ох}} = t_{\text{cp}}^{\text{п,н}} + \Delta t_{\text{cp}}^{\text{пер}} = 36 + 12 = 48, \quad (31)$$

$\lambda=0,516$ Вт/(м·К); $\mu=0,87 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\rho=1016$ кг/м³; $C=3870$ Дж/(кг·К); $Pr=6,5$
[1,2].

$$Re = \frac{W_{\text{п}} \rho d_3}{\mu} = \frac{0,26 \cdot 1016 \cdot 0,0056}{0,87 \cdot 10^{-3}} = 1700. \quad (32)$$

Секция пастеризации.

Для потока горячей воды, $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{cp}}^{\text{г.в}} = \frac{t_{\text{г.в}}^{\text{н}} + t_{\text{г.в}}^{\text{к}}}{2} = \frac{74 + 71,2}{2} = 72,6, \quad (33)$$

$\lambda=0,67$ Вт/(м·К); $\mu=0,39 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\rho=976$ кг/м³; $C=4212$ Дж/(кг·К); $Pr=2,46$
[4].

$$Re = \frac{W_{\text{г.в}} \rho d_3}{\mu} = \frac{0,5 \cdot 976 \cdot 0,0056}{0,39 \cdot 10^{-3}} = 7287. \quad (34)$$

Для потока продукта, $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{cp}}^{\text{п}} = t_{\text{cp}}^{\text{г.в}} - \Delta t_{\text{cp}}^{\text{п}} = 72,6 - 5,3 = 67,3, \quad (35)$$

$\lambda=0,521$ Вт/(м·К); $\mu=0,66 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\rho=1008$ кг/м³; $C=3854$ Дж/(кг·К);
 $Pr=5$ [1,2].

$$Re = \frac{W_{\text{п}} \rho d_3}{\mu} = \frac{0,26 \cdot 1008 \cdot 0,0056}{0,66 \cdot 10^{-3}} = 1234. \quad (36)$$

Секция водяного охлаждения.

Для потока холодной воды, °С

$$t_{\text{ср}}^{\text{х.в}} = \frac{t_{\text{х.в}}^{\text{н}} + t_{\text{х.в}}^{\text{к}}}{2} = \frac{6 + 10,3}{2} = 8, \quad (37)$$

$\lambda=0,57$ Вт/(м·К); $\mu=1,42 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\rho=999,6$ кг/м³; $C=4218$ Дж/(кг·К); $Pr=10,4$ [4].

$$Re = \frac{W_{\text{х.в}} \rho d_3}{\mu} = \frac{0,26 \cdot 999,6 \cdot 0,0056}{1,42 \cdot 10^{-3}} = 1025. \quad (38)$$

Для потока продукта, °С

$$t_{\text{ср}}^{\text{п}} = t_{\text{ср}}^{\text{х.в}} + \Delta t_{\text{ср}}^{\text{в.ох}} = 8 + 7,9 \approx 16, \quad (39)$$

$\lambda=0,495$ Вт/(м·К); $\mu=1,82 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\rho=1029$ кг/м³; $C=3890$ Дж/(кг·К);

$Pr=14,3$ [1,2].

$$Re = \frac{W_{\text{п}} \rho d_3}{\mu} = \frac{0,26 \cdot 1029 \cdot 0,0056}{1,82 \cdot 10^{-3}} = 832. \quad (40)$$

Секция рассольного охлаждения.

Для потока рассола, °С

$$t_{\text{ср}}^{\text{р}} = \frac{t_{\text{р}}^{\text{н}} + t_{\text{р}}^{\text{к}}}{2} = \frac{-4 + 0}{2} = -2, \quad (41)$$

$\lambda=0,53$ Вт/(м·К); $\mu=3,32 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\rho=1182$ кг/м³; $C=3330$ Дж/(кг·К); $Pr=21$

[табл. 6 приложения].

$$Re = \frac{W_p \rho d_3}{\mu} = \frac{0,52 \cdot 1182 \cdot 0,0056}{3,32 \cdot 10^{-3}} = 1037. \quad (42)$$

Для потока продукта, °C

$$t_{cp}^n = t_{cp}^p + \Delta t_{cp}^{p,ox} = -2 + 8,5 = 6,5, \quad (43)$$

$\lambda=0,43$ Вт/(м·К); $\mu=3 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\rho=1033,3$ кг/м³; $C=3876$ Дж/(кг·К); $Pr=26,6$ [1,2].

$$Re = \frac{W_p \rho d_3}{\mu} = \frac{0,26 \cdot 1033,3 \cdot 0,0056}{3 \cdot 10^{-3}} = 501. \quad (44)$$

2.5. Определение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи

Коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 для пластин П-2 рассчитывают по выражению:

$$\alpha = 0,1 \cdot Re^{0,7} \cdot Pr^{0,43} \cdot \frac{\lambda}{d_3}. \quad (45)$$

Коэффициенты теплопередачи в секциях регенерации теплоты и пастеризации определяют с учетом возможного образования отложений на поверхности пластин, что снижает рабочую поверхность. Этот факт учитывается коэффициентом использования поверхности теплообмена (φ), который принимается для горячих секций $\varphi=0,85$, для остальных секций коэффициент равен $\varphi=1$, Вт/(м²К)

$$K = \frac{\varphi}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (46)$$

где $\delta_{ст}=0,0012$ м, толщина стенки пластины; $\lambda_{ст}=15,12$ Вт/(мК) – коэффициент теплопроводности материала пластин.

Секция регенерации.

При нагревании продукта

$$\alpha_1 = 0,1 \cdot 1216^{0,7} \cdot 9,55^{0,43} \cdot \frac{0,503}{0,0056} = 3422 \text{ Вт/м}^2\text{К.} \quad (47)$$

При охлаждении пастеризованного продукта

$$\alpha_2 = 0,1 \cdot 1700^{0,7} \cdot 6,5^{0,43} \cdot \frac{0,516}{0,0056} = 3761 \text{ Вт/м}^2\text{К.} \quad (48)$$

Коэффициент теплопередачи

$$K_{\text{рег}} = \frac{0,85}{\frac{1}{3422} + \frac{0,0012}{15,12} + \frac{1}{3761}} = 1334 \text{ Вт/м}^2\text{К.} \quad (49)$$

Секция пастеризации.

При охлаждении горячего теплоносителя

$$\alpha_1 = 0,1 \cdot 7287^{0,7} \cdot 2,64^{0,43} \cdot \frac{0,67}{0,0056} = 8908 \text{ Вт/м}^2\text{К.} \quad (50)$$

При нагревании продукта

$$\alpha_2 = 0,1 \cdot 2234^{0,7} \cdot 5^{0,43} \cdot \frac{0,521}{0,0056} = 4107 \text{ Вт/м}^2\text{К.} \quad (51)$$

Коэффициент теплопередачи

$$K_{\text{п}} = \frac{0,85}{\frac{1}{8908} + \frac{0,0012}{15,12} + \frac{1}{4107}} = 1954 \text{ Вт/м}^2\text{К.} \quad (52)$$

Секция водяного охлаждения.

При охлаждении продукта

$$\alpha_1 = 0,1 \cdot 832^{0,7} \cdot 14,3^{0,43} \cdot \frac{0,495}{0,0056} = 3071 \text{ Вт/м}^2\text{К.} \quad (53)$$

При нагревании воды

$$\alpha_2 = 0,1 \cdot 1025^{0,7} \cdot 10,4^{0,43} \cdot \frac{0,57}{0,0056} = 3569 \text{ Вт/м}^2\text{К.} \quad (54)$$

Коэффициент теплопередачи

$$K_{\text{в.ох}} = \frac{1}{\frac{1}{3071} + \frac{0,0012}{15,12} + \frac{1}{3569}} = 1460 \text{ Вт/м}^2\text{К.} \quad (55)$$

Секция рассольного охлаждения.

При охлаждении продукта

$$\alpha_1 = 0,1 \cdot 501^{0,7} \cdot 26,6^{0,43} \cdot \frac{0,43}{0,0056} = 2443 \text{ Вт/м}^2\text{К.} \quad (56)$$

При нагревании рассола

$$\alpha_2 = 0,1 \cdot 1037^{0,7} \cdot 21^{0,43} \cdot \frac{0,53}{0,0056} = 4626 \text{ Вт/м}^2\text{К.} \quad (57)$$

Коэффициент теплопередачи

$$K_{\text{р.ох}} = \frac{1}{\frac{1}{2443} + \frac{0,0012}{15,12} + \frac{1}{4626}} = 1409 \text{ Вт/м}^2\text{К.} \quad (58)$$

2.6. Расчет поверхности теплообмена, числа пластин и пакетов в установке. Компоновка секций

Поверхность теплообмена секций аппарата рассчитывают по уравнению теплопередачи с учетом ранее определенных тепловых нагрузок Q , средних температурных напоров Δt_{cp} и коэффициентов теплопередачи K

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}}. \quad (59)$$

Компоновочные расчеты:

число пластин в секции

$$n = \frac{F}{f}, \quad (60)$$

где $f=0,2 \text{ м}^2$ – рабочая поверхность пластин;

число пакетов в секции со стороны продукта

$$x = \frac{n}{2 \cdot m}, \quad (61)$$

где m – число параллельных каналов (определено ранее);

число параллельных каналов со стороны рабочей жидкости (горячей или холодной воды, рассола)

$$m_{p.ж.} = \frac{G_{p.ж.}}{W_{p.ж.} \cdot S_k \cdot \rho_{p.ж.}}, \quad (62)$$

где $G_{p.ж.}$ (кг/с), $W_{p.ж.}$ (м/с), $\rho_{p.ж.}$ (кг/м³) – массовый расход, скорость и плотность рабочей жидкости; S_k – площадь поперечного сечения канала, м² (для пластины П-2 $S_k=7,57 \cdot 10^{-4}$, см. приложение).

Число пакетов со стороны рабочей жидкости:

$$X_{p.ж.} = \frac{x \cdot m}{m_{p.ж.}}, \quad (63)$$

Все параметры компоновочного расчета округляются до целого числа по правилам округления за исключением секции пастеризации. Для этой секции округление числа пакетов следует проводить в большую сторону, так как округление в меньшую сторону может привести к значительному понижению температуры продукта на выходе из секции – заданной температуры пастеризации, что является недопустимым.

Формула компоновки секции:

$$\frac{x \cdot m}{X_{p.ж.} \cdot m_{p.ж.}} = 1. \quad (64)$$

При несовпадении общего числа каналов со стороны продукта и рабочей жидкости в выражении (64) его корректировку следует проводить изменением скорости рабочей жидкости с последующим уточнением коэффициента теплоотдачи рабочей жидкости, коэффициента теплопередачи и окончательной проверки формулы компоновки секции.

Секция регенерации теплоты.

Поверхность теплопередачи, м²

$$F_{per} = \frac{261733}{1334 \cdot 12} = 16,35. \quad (65)$$

Число пластин в секции

$$n_{per} = \frac{16,35}{0,2} = 82. \quad (66)$$

Количество пакетов при числе каналов в пакете $m=7$

$$x_{\text{пер}} = \frac{82}{2 \cdot 7} = 5,86. \quad (67)$$

Принимаем симметричную компоновку секции с $x_{\text{пер}}=6$. Формула компоновки:

$$\frac{7+7+7+7+7+7}{7+7+7+7+7+7}.$$

Секция пастеризации.

Поверхность теплопередачи, м

$$F_{\text{п}} = \frac{64250}{1954 \cdot 5,3} = 6,16. \quad (68)$$

Число пластин в секции

$$n_{\text{п}} = \frac{6,16}{0,2} = 31. \quad (69)$$

Количество пакетов в секции со стороны продукта

$$x_{\text{п}} = \frac{31}{2 \cdot 7} = 2,2. \quad (70)$$

Ввиду того, что температура пастеризованного продукта на выходе из секции должна быть не менее 72 °С, принимаем $x_{\text{п}}=3$.

Число параллельных каналов со стороны горячей воды

$$m_{\text{г.в.}} = \frac{5,56}{0,5 \cdot 7,57 \cdot 10^{-4} \cdot 976} = 14,5. \quad (71)$$

Так как количество каналов со стороны продукта ($3 \cdot 7=21$) и рабочей жидкости ($m_{\text{г.в.}}=15$) не совпадает, принимаем скорость горячей воды $W_{\text{г.в.}}=0,36$ м/с. Тогда число параллельных каналов со стороны горячей воды

$$m_{г.в.} = \frac{5,56}{0,36 \cdot 7,57 \cdot 10^{-4} \cdot 976} = 21. \quad (72)$$

Принимаем $m_{г.в.}=21$, все каналы со стороны горячей воды соединяем в один пакет

$$x_{г.в.} = \frac{3 \cdot 7}{21} = 1. \quad (73)$$

Формула предварительной компоновки:

$$\frac{7 + 7 + 7}{21}.$$

Уточнение всех параметров ввиду принятия новой скорости горячей воды.

Средний температурный напор в секции с учетом поправки на смешанный ток, °С

$$\Delta t_{п}^{см} = \varepsilon_{\Delta t} \cdot \Delta t_{п} = 0,94 \cdot 5,3 = 5. \quad (74)$$

Режим движения горячей воды

$$Re = \frac{W_{г.в.} \rho d_{э}}{\mu} = \frac{0,36 \cdot 976 \cdot 0,0056}{0,39 \cdot 10^{-3}} = 5045. \quad (75)$$

Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К)

$$\alpha_1 = 0,1 \cdot Re_{г.в.}^{0,7} \cdot Pr_{г.в.}^{0,43} \cdot \frac{\lambda_{г.в.}}{d_3} = 0,1 \cdot 5045^{0,7} \cdot 2,64^{0,43} \cdot \frac{0,67}{0,0056} = 7098. \quad (76)$$

Коэффициент теплопередачи, Вт/(м²К)

$$K = \frac{\varphi}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{0,85}{\frac{1}{7098} + \frac{0,0012}{15,12} + \frac{1}{4107}} = 1834. \quad (77)$$

Уточненная поверхность теплопередачи, м²

$$F_{\Pi} = \frac{64250}{1834 \cdot 5} = 6,98. \quad (78)$$

Число пластин

$$n_{\Pi} = \frac{6,98}{0,2} = 35. \quad (79)$$

Количество пакетов в секции со стороны продукта

$$x_{\Pi} = \frac{35}{2 \cdot 7} = 2,5. \quad (80)$$

Таким образом, при целом числе пакетов в секции $x_{\Pi}=3$ окончательная компоновка соответствует предварительной:

$$\frac{7+7+7}{21}.$$

Секция водяного охлаждения.

Поверхность теплопередачи, м²

$$F_{\text{в.ох}} = \frac{76028}{1460 \cdot 7,9} = 6,6. \quad (81)$$

Число пластин в секции

$$n_{\text{в.ох}} = \frac{6,6}{0,2} = 33. \quad (82)$$

Количество пакетов в секции со стороны продукта

$$x_{\text{в.ох}} = \frac{33}{2 \cdot 7} = 2,4. \quad (83)$$

Принимаем $x_{\Pi}=2$.

Число параллельных каналов со стороны холодной воды

$$m_{x.в.} = \frac{4,17}{0,25 \cdot 7,57 \cdot 10^{-4} \cdot 999,6} = 22. \quad (84)$$

Так как число каналов со стороны продукта ($2 \cdot 7 = 14$) не совпадает с числом каналов со стороны рабочей жидкости (22) необходимо изменить скорость холодной воды.

Формула предварительной компоновки секции водяного охлаждения:

$$\frac{7 + 7}{14 + 14}.$$

Корректируем скорость холодной воды по выражению (84) из расчета 14 каналов: $W_{г.в.} = 0,39 \text{ м/с}$.

Уточнение всех параметров ввиду принятой новой скорости холодной воды.

Режим движения горячей воды

$$Re = \frac{W_{x.в.} \rho d_3}{\mu} = \frac{0,39 \cdot 999,6 \cdot 0,0056}{1,42 \cdot 10^{-3}} = 1537. \quad (85)$$

Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К)

$$\alpha_2 = 0,1 \cdot 1537^{0,7} \cdot 10,4^{0,43} \cdot \frac{0,57}{0,0056} = 4741. \quad (86)$$

Коэффициент теплопередачи, Вт/(м²К)

$$K_{в.ох} = \frac{1}{\frac{1}{3071} + \frac{0,0012}{15,12} + \frac{1}{4741}} = 1622. \quad (87)$$

Уточненная поверхность теплопередачи, м²

$$F_{в.ох} = \frac{76028}{1622 \cdot 7,9} = 5,9. \quad (88)$$

Число пластин

$$n_{\text{в.ох}} = \frac{5,9}{0,2} = 29,5. \quad (89)$$

Принимаем $n_{\text{в.ох}}=30$.

Количество пакетов в секции со стороны продукта

$$x_{\text{в.ох}} = \frac{30}{2 \cdot 7} = 2,14. \quad (90)$$

Таким образом, при целом числе пакетов в секции $x_{\text{в.ох}}=2$ окончательная компоновка соответствует предварительной:

$$\frac{7+7}{14+14}.$$

Секция рассольного охлаждения.

Поверхность теплопередачи, м^2

$$F_{\text{р.ох}} = \frac{37683}{1409 \cdot 8,5} = 3,15. \quad (91)$$

Число пластин в секции

$$n_{\text{р.ох}} = \frac{3,15}{0,2} = 15,8. \quad (92)$$

Принимаем $n_{\text{р.ох}}=16$

Количество пакетов в секции со стороны продукта

$$x_{\text{в.ох}} = \frac{16}{2 \cdot 7} = 1,1. \quad (93)$$

Принимаем $x_{\text{р.ох}}=1$.

Число параллельных каналов со стороны рассола

$$m_{p.ox.} = \frac{2,8}{0,5 \cdot 7,57 \cdot 10^{-4} \cdot 1182} = 6,2. \quad (94)$$

Принимаем $m_{p.ox.}=6$.

Формула предварительной компоновки секции рассольного охлаждения:

$$\frac{7}{6} \neq 1.$$

Корректируем скорость рассола по выражению (94) из расчета 7 каналов:

$$W_p=0,45\text{м/с}.$$

Уточнение режима движения рассола

$$Re = \frac{W_p \rho d_3}{\mu} = \frac{0,45 \cdot 1182 \cdot 0,0056}{3,32 \cdot 10^{-3}} = 900. \quad (95)$$

Ввиду того, что новое значение критерия Рейнольдса для рассола практически не изменилось, полагаем, что коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи останутся прежними.

Окончательная компоновка секции:

$$\frac{7}{7}.$$

Компоновочная схема теплообменного аппарата в целом:

$$\text{секция регенерации } \frac{7+7+7+7+7+7}{7+7+7+7+7+7};$$

$$\text{секция пастеризации } \frac{7+7+7}{21};$$

секция водяного охлаждения $\frac{7+7}{14+14}$;

секция рассольного охлаждения $\frac{7}{7}$.

2.7. Определение гидравлического сопротивления

Целью гидравлического расчета теплообменного аппарата является определение необходимого напора, которым должен обладать насос 11 (см. рис.1) для перемещения продукта через все секции с заданной скоростью. Расчет гидравлического сопротивления ведется для каждой секции аппарата, а затем суммируется.

Секция регенерации теплоты.

Коэффициент гидравлического сопротивления единицы длины канала

$$\zeta = 11,2 \cdot \text{Re}^{-0,25} = 11,2 \cdot 1216^{-0,25} = 1,9. \quad (96)$$

Гидравлическое сопротивление секции, Па

$$\Delta P_{\text{рег}} = \zeta \cdot \frac{L_{\text{п}}}{d_{\text{э}}} \cdot \frac{\rho W^2}{2} x_{\text{рег}} = 1,9 \cdot \frac{0,8}{0,0056} \cdot \frac{1023 \cdot 0,25^2}{2} \cdot 6 = 52063, \quad (97)$$

где $L_{\text{п}}$ – приведенная длина одного канала пластины П-2, м; $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр канала, м; ρ – плотность продукта, кг/м³; W – скорость движения, м/с; $x_{\text{рег}}$ – количество пакетов в секции.

Секция пастеризации.

Коэффициент гидравлического сопротивления единицы длины канала

$$\zeta = 11,2 \cdot \text{Re}^{-0,25} = 11,2 \cdot 1234^{-0,25} = 1,9. \quad (98)$$

Гидравлическое сопротивление секции, Па

$$\Delta P_{\Pi} = \zeta \cdot \frac{L_{\Pi} \rho W^2}{d_3} x_{\Pi} = 1,9 \cdot \frac{0,8}{0,0056} \frac{1008 \cdot 0,25^2}{2} \cdot 3 = 25650. \quad (99)$$

Секция водяного охлаждения.

Коэффициент гидравлического сопротивления единицы длины канала

$$\zeta = 11,2 \cdot \text{Re}^{-0,25} = 11,2 \cdot 832^{-0,25} = 2,1. \quad (98)$$

Гидравлическое сопротивление секции, Па

$$\Delta P_{\text{в.ох}} = \zeta \cdot \frac{L_{\Pi} \rho W^2}{d_3} x_{\text{в.ох}} = 2,1 \cdot \frac{0,8}{0,0056} \frac{1029 \cdot 0,25^2}{2} \cdot 2 = 19294. \quad (99)$$

Секция рассольного охлаждения.

Коэффициент гидравлического сопротивления единицы длины канала

$$\zeta = 11,2 \cdot \text{Re}^{-0,25} = 11,2 \cdot 900^{-0,25} = 2. \quad (100)$$

Гидравлическое сопротивление секции, Па

$$\Delta P_{\text{р.ох}} = \zeta \cdot \frac{L_{\Pi} \rho W^2}{d_3} x_{\text{р.ох}} = 2 \cdot \frac{0,8}{0,0056} \frac{1033,3 \cdot 0,25^2}{2} \cdot 1 = 9226. \quad (101)$$

Общее сопротивление аппарата по тракту движения продукта, Па:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{рег}} + \Delta P_{\Pi} + \Delta P_{\text{в.ох}} + \Delta P_{\text{р.ох}} = 52063 + 25650 + 19294 + 9226 = 106233. \quad (102)$$

Средняя плотность продукта при его движении по всем секциям:

$$\rho = \frac{1023 + 1008 + 1029 + 1033,3}{4} = 1023. \quad (103)$$

Необходимый напор насоса, м:

$$H = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} = \frac{106233}{1023 \cdot 9,81} = 1. \quad (104)$$

Объемный расход продукта, м³/с:

$$Q = \frac{G_{\text{п}}}{\rho} = \frac{5000}{3600 \cdot 1023} = 1,36 \cdot 10^{-3}. \quad (105)$$

По необходимому напору H и объемному расходу Q выбираем стандартный центробежный насос с параметрами [3]:

- напор $H = \text{м}$;

- объемный расход $Q = \text{м}^3/\text{с}$.

2.8. Определение основных габаритных размеров пластинчатого теплообменного аппарата

К основным габаритным размерам пластинчатого теплообменного аппарата относятся его ширина, высота и длина. Ширина теплообменника определяется шириной используемых рабочих пластин (например, пластин типа П-2). Высота аппарата определяется высотой опорных и нажимных плит. Эти плиты являются аналогичными для основных типов пластинчатых теплообменников и их высота приводится в приложении. Длина же аппарата (длина штанг) зависит от количества рядовых, граничных и концевых пластин и подлежит расчету, м

$$L = (n_{\text{общ}} - 1) \cdot S + 2 \cdot \delta + n_1 \cdot \delta_1 + 0,5, \quad (106)$$

где $n_{\text{общ}}$ – общее количество пластин всех типов; $S = 0,003$ м – толщина уплотнения пластин в сжатом состоянии; δ – толщина опорной (нажимной) плиты, м, определяется результатом прочностного расчета; n_1 – количество межсекционных плит (определяется количеством секций в аппарате); δ_1 (например 0,06 м) – толщина межсекционных плит (определяется условным проходом угловых штуцеров (см. приложение, 50 мм для пластины П-2)); 0,5 м – расстояние, необходимое для разборки аппарата.

Рассмотрим определение длины аппарата на примере ранее приведенного расчета.

Общее количество пластин всех типов:

$$n_{\text{общ}} = n_{\text{ряд}} + n_{\text{гран}} + n_{\text{кон}}. \quad (107)$$

Секция регенерации имеет только рядовые пластины (см. формулу компоновки секции и рис.8). Количество рядовых пластин

$$n_{\text{общ}}^{\text{рег}} = n_{\text{ряд}} = 2 \cdot m \cdot x_{\text{рег}} = 2 \cdot 7 \cdot 6 = 84. \quad (108)$$

Секция пастеризации имеет 1 концевую пластину, 3 граничных (см. формулу компоновки секции и рис.8). Количество рядовых и граничных пластин

$$n_{\text{ряд,гран}}^{\text{паст}} = 2 \cdot m \cdot x_{\text{паст}} = 2 \cdot 7 \cdot 3 = 42. \quad (109)$$

Общее количество пластин в секции:

$$n_{\text{общ}}^{\text{паст}} = n_{\text{ряд,гран}}^{\text{паст}} + 1 = 42 + 1 = 43. \quad (110)$$

Секция водяного охлаждения имеет рядовые и 2 граничных пластины (см. формулу компоновки секции и рис.8). Общее количество пластин (количество рядовых и граничных пластин) :

$$n_{\text{общ}}^{\text{в.ох}} = n_{\text{ряд,гран}}^{\text{в.ох}} = 2 \cdot m \cdot x_{\text{в.ох}} = 2 \cdot 7 \cdot 2 = 28. \quad (111)$$

Секция рассольного охлаждения имеет 1 концевую и 1 рядовую пластину (см. формулу компоновки секции и рис.8). Количество рядовых и граничных пластин:

$$n_{\text{ряд}}^{\text{р.ох}} = 2 \cdot m \cdot x_{\text{р.ох}} = 2 \cdot 7 \cdot 1 = 14. \quad (112)$$

Общее количество пластин в секции:

$$n_{\text{общ}}^{\text{p.ox}} = n_{\text{ряд}}^{\text{p.ox}} + 1 = 14 + 1 = 15. \quad (113)$$

Общее количество пластин в аппарате:

$$n_{\text{общ}} = n_{\text{общ}}^{\text{рег}} + n_{\text{общ}}^{\text{паст}} + n_{\text{общ}}^{\text{в.ox}} + n_{\text{общ}}^{\text{p.ox}} = 84 + 43 + 28 + 15 = 170. \quad (114)$$

Количество межсекционных плит n_1 при имеющихся четырех секциях в аппарате равно 3.

Толщина опорной и нажимной плиты δ может быть определена из условия прочности:

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (115)$$

где σ – расчетное напряжение, МПа; $\sigma_{\text{доп}}$ – нормативное допускаемое напряжение, МПа, принимают меньшее из двух значений

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{доп}} &= \frac{\sigma_{\text{в}}}{n_{\text{в}}}; \\ \sigma_{\text{доп}} &= \frac{\sigma_{\text{т}}}{n_{\text{т}}}, \end{aligned} \quad (116)$$

$\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{\text{т}}$ – предел прочности и предел текучести материала плит, определяется по справочнику [5] (например, для стали Х18Н10Т $\sigma_{\text{в}}=530$, $\sigma_{\text{т}}=234$), $n_{\text{в}}=2,6$, $n_{\text{т}}=1,5$ – коэффициенты запаса по пределу прочности и пределу текучести соответственно. Момент сопротивления прямоугольного сечения плит рассчитывается по выражению, м³:

$$W = \frac{\delta \cdot h^2}{6}, \quad (117)$$

где h – высота плит, м (см. приложение); δ – толщина плит, м (задаются с последующей проверкой по выражению 115). Изгибающий момент M определяют по уравнению, МН·м:

$$M = Q \cdot h, \quad (118)$$

где $Q = q_{уд} \cdot S$ – сила, необходимая для обеспечения герметичности пластинчатого аппарата (усилие, необходимое для пластической деформации уплотнений пластин), МН; $S = (2B + 2H) \cdot \delta \cdot n_{общ}$ – площадь поверхности прокладки, м²; B и H – ширина и высота пластины (см. приложение), м; $q_{уд}$ – удельное давление, необходимое для пластической деформации уплотнения, МПа; δ – толщина прокладки, м.

Таблица 2

Удельное давление для различных материалов уплотнения

Материал	$q_{уд}$, МПа
Резина мягкая	3,5
Резина твердая с тканью	5,3
Паронит $\delta=3$ мм	11
Паронит $\delta=2$ мм	25
Паронит $\delta=1$ мм	40
Мягкая сталь	120
Медь, алюминий	80-90

Порядок определения необходимой толщины опорной и нажимной плиты на примере ранее приведенного расчета.

Материал уплотнения - резина мягкая, $\delta=0,003$ м.

Площадь поверхности герметизации, м²:

$$S = (2B + 2H) \cdot \delta \cdot n_{общ} = (2 \cdot 0,315 + 2 \cdot 1,02) \cdot 0,003 \cdot 170 = 1,36. \quad (119)$$

Необходимое усилие, МН:

$$Q = q_{уд} \cdot S = 3,5 \cdot 1,36 = 4,8. \quad (120)$$

Изгибающий момент, МН·м:

$$M = Q \cdot h = 4,8 \cdot 1,02 = 4,9. \quad (121)$$

Нормативное допускаемое напряжение, МПа:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{доп}} &= \frac{\sigma_{\text{в}}}{n_{\text{в}}} = \frac{530}{2,6} = 203,8 \\ \sigma_{\text{доп}} &= \frac{\sigma_{\text{т}}}{n_{\text{т}}} = \frac{234}{1,5} = 156 \end{aligned} \quad (122)$$

Принимаем $\sigma_{\text{доп}}=156$ МПа. Задаемся толщиной плит $\delta=0,25$ м.

Момент инерции сечения плиты, м³:

$$W = \frac{\delta \cdot h^2}{6} = \frac{0,25 \cdot 1,02^2}{6} = 0,043. \quad (123)$$

Расчетное напряжение, МПа:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{4,9}{0,043} = 114, \quad (124)$$

условие прочности выполняется.

Длина аппарата, м:

$$L = (n_{\text{общ}} - 1) \cdot S + 2 \cdot \delta + n_1 \cdot \delta_1 + 0,5 = (170 - 1) \cdot 0,003 + 2 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,06 = 1,5 \quad (125)$$

Список библиографических источников

1. Волчков, И.И. Теплообменные аппараты для молока и молочных продуктов /И.И. Волчков. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 216 с.
2. Барановский, Н.В. Пластинчатые теплообменники пищевой промышленности / Н.В. Барановский.- М.:Машгиз,1962. – 325 с.
3. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии / Ю. И. Дытнерский. - М.: Химия, 1995. - 400 с.
4. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии /К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. М-Л.: Химия, 1987. – 575с.
5. Лацинский, А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры /А.А. Лацинский, А.Р.Толчинский. – Л.: Машиностроение, 1970. – 752с.
6. Вобликова, Т.В. Процессы и аппараты пищевых производств: учебное пособие/ Т.В.Вобликова, С.И.Шлыков, А.В.Пермяков- 4-е изд., стер.-Спб.: Издательство “Лань”, 2019.-204 с.:ил.- (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978-5-8114-4163-1.
7. Процессы и аппараты пищевых производств и биотехнологии: учебное пособие/Д.М.Бородулин [и др.] - 2-е изд., исп.-Спб.: Издательство “Лань”, 2019.-292 с.:ил.- (Учебники для вузов. Специальная литература).

Приложение

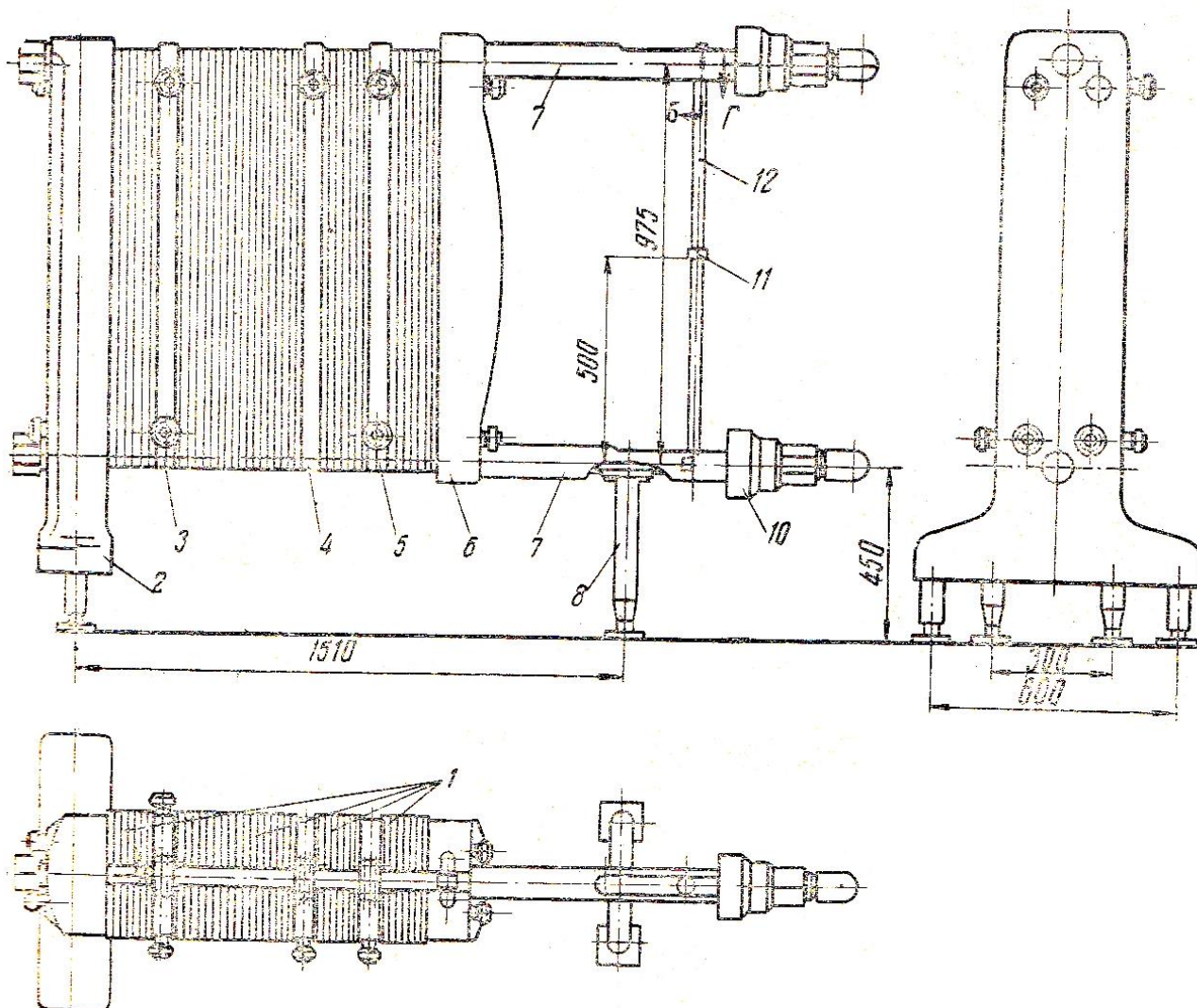
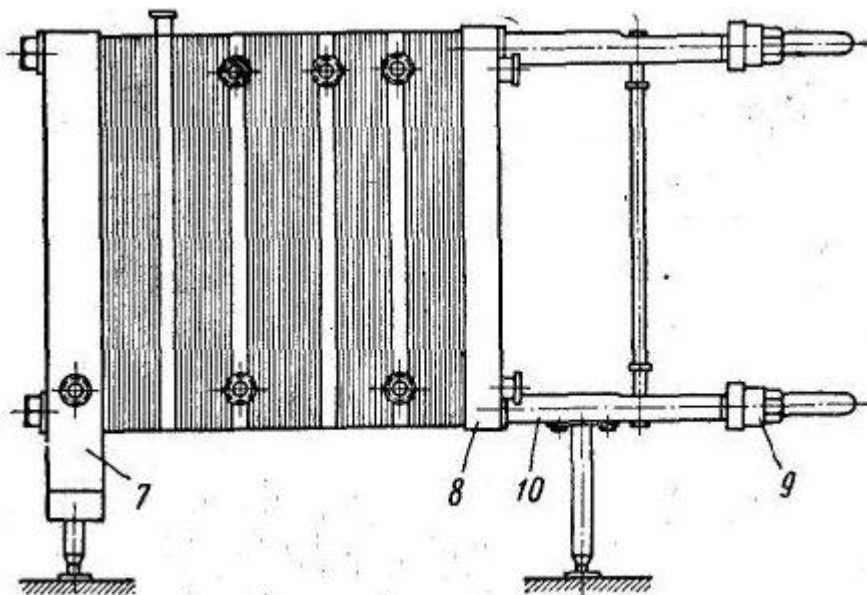
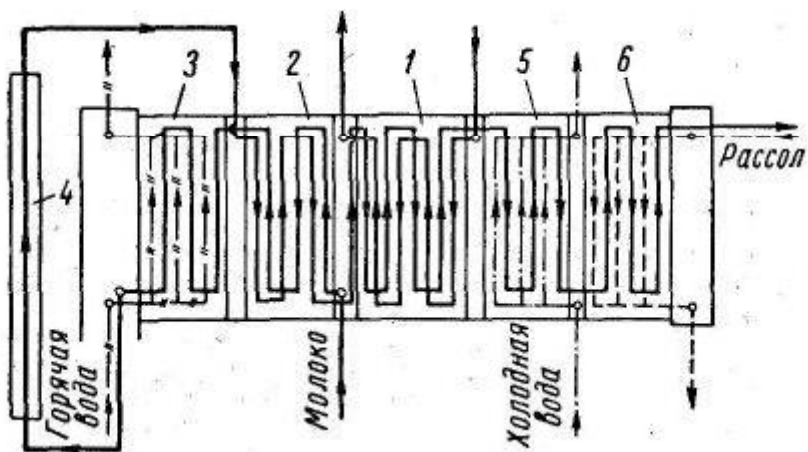


Рис.9. Пластинчатый теплообменник пастеризационно-охладительной установки ОП2-У5: 1-пластины; 2-опорная плита; 3,4,5-межсекционные плиты; 6-нажимная плита; 7-штанги; 8-опора; 9,10-зажимные механизмы; 11-амортизатор; 12-распорка



а



б

Рис.10.Пластинчатый теплообменник пастеризационно-охладительных установок ОПУ-3М и ОПУ-5М: а-общий вид; б-схема; 1и 2-секции регенерации; 3-секция пастеризации; 4-выдерживатель; 5 и 6 –секции водяного и рассольного охлаждения; 7 и 8-опорная и нажимная плиты; 9-винтовые зажимные механизмы; 10- накладки

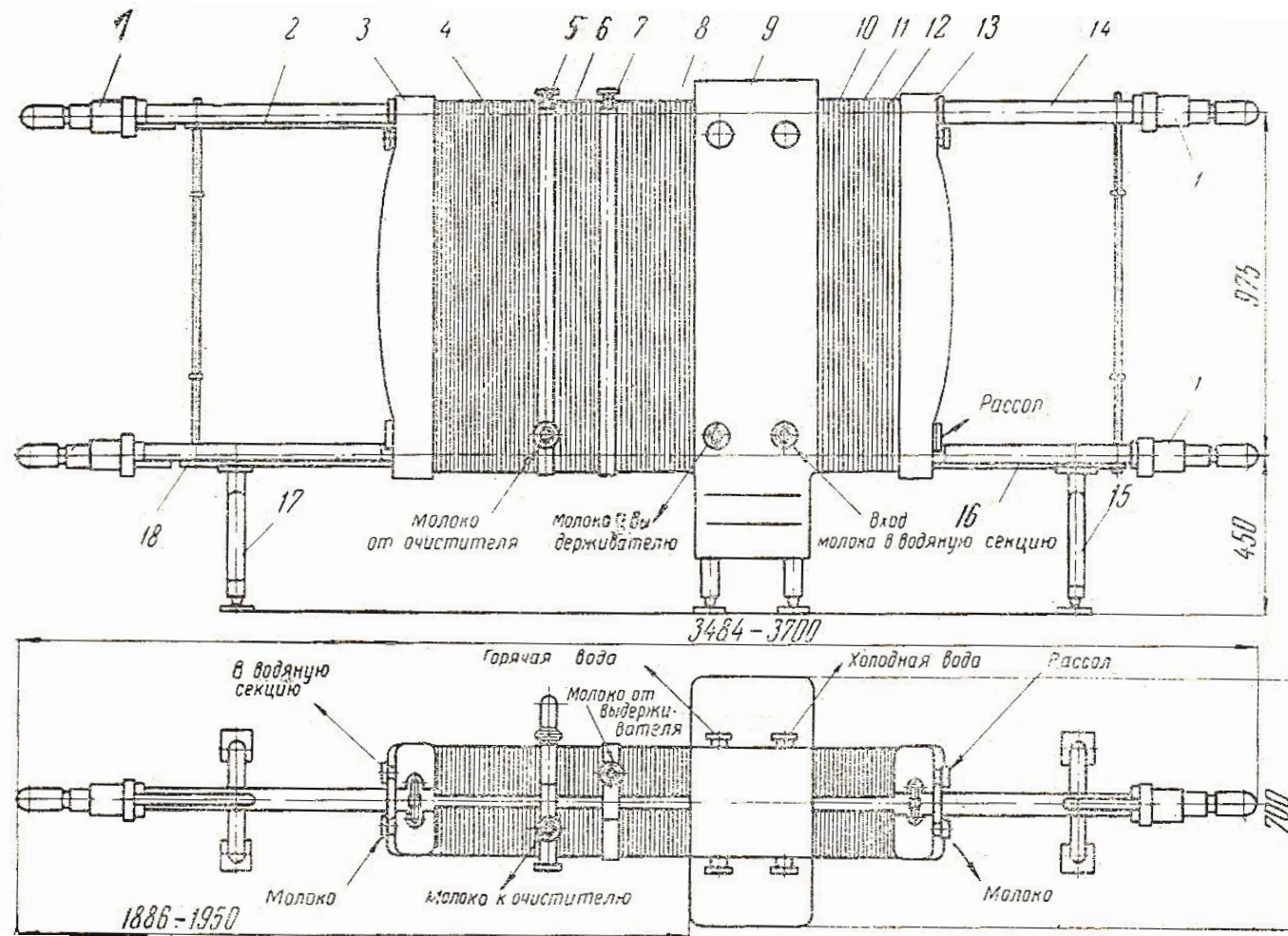


Рис.11. Пластинчатый теплообменник пастеризационно-охладительной установки ОПУ-10: 1-зажимные механизмы; 2,18-накладки штанг; 3,13-нажимные плиты; 4,6,8,10,12-пластины секций регенерации I, регенерации II, пастеризации, водяного и рассольного охлаждения; 5,7,11-межсекционные плиты; 9-опорная плита; 14,16-штанги;15,17-опор

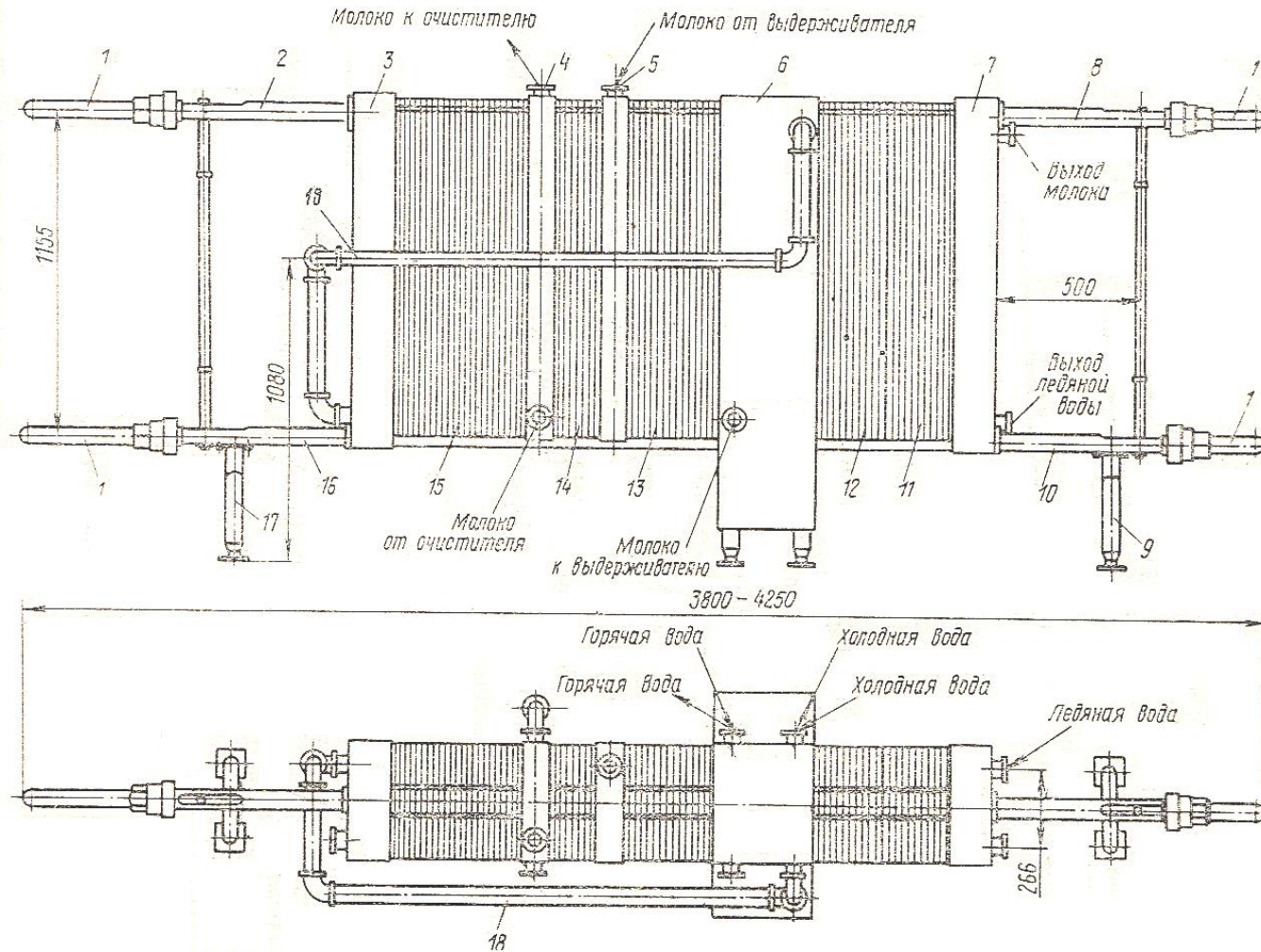


Рис.12. Пластинчатый теплообменник пастеризационно-охладительной установки ОПУ-15: 1-зажимные механизмы; 2,8,10,16-штанги; 3,7-нажимные плиты; 4,5- межсекционные плиты; 6-опорная плита; 9,17-опоры; 11,12,13,14,15- пластины секций охлаждения холодной и ледяной водой, пастеризации, регенерации II, регенерации I

Таблица 3

Характеристика теплообменников пастеризационно-охладительных установок
ОПУ-3М; ОПУ-5М; ОП2-У5; ОПУ-10; ОПУ-15 для молока

Показатели	Пастеризационно-охладительная установка				
	ОПУ-3М	ОПУ-5М	ОП2-У5	ОПУ-10	ОПУ-15
Производительность, м ³ /час	3	5	5	10	15
Начальная температура, °С	5÷10	5÷10	5÷10	5÷10	5÷10
Температура пастеризации, °С	76±2	72÷76	76±2	76±2	76±2
Температура охлажденного молока, °С	4±2	3÷5	4±2	4±2	4±2
Коэффициент регенерации	0,8	0,82	0,82	0,82	0,85
Температура горячей воды, °С	79	75÷79	79	79	79
Температура холодной воды, °С	8÷10	8÷10	8÷10	8÷10	8÷10
Температура рассола или ледяной воды, °С	-5	-5	-5	-5	0÷0,5
Расход горячей воды, м ³ /час	15	20	25	50	60
Расход холодной воды, м ³ /час	9	15	15	30	40
Расход рассола или ледяной воды, м ³ /час	6	10	10	20	40
Количество секций	4	4	4	4	4
Скорость молока, м/с	0,37	0,47	0,47	0,44	0,37
Скорость горячей воды, м/с	0,63	0,78	0,78	0,74	0,37
Скорость холодной воды, м/с	0,5	0,47	0,47	0,66	0,32
Скорость рассола, м/с	0,37	0,31	0,31	0,7	0,32

Характеристика теплообменников пастеризационно-охладительных установок
ОПЖ-5 и ОПЖ-10 для стерилизации молока (рис.1,2)

Показатели	Пастеризационно-охладительная установка	
	ОПЖ-5	ОПЖ-10
1	2	3
Производительность, м ³ /час	5	10
Начальная температура молока, °С	5÷10	5÷10
Температура стерилизации молока, °С	135÷140	135÷140
Выдержка при температуре 80 °С, мин	5	5
Температура охлажденного молока, °С	20(4)	20(4)
Теплоноситель	Горячая вода и пар	
Температура горячей воды, °С	90÷92	90÷92
Расход горячей воды, м ³ /час	20	50
Давление пара, МПа	0,5	0,5
Расход пара, м ³ /час	300	500
Хладоноситель	Ледяная и водопроводная вода	
Температура ледяной воды, °С	0÷1	0÷1
Расход ледяной воды, м ³ /час	20	50
Температура водопроводной воды, °С	20	20
Коэффициент регенерации теплоты	0,8	0,8
Общая поверхность теплообмена, м ²	39	80
Тип пластин	П-2	П-3
Поверхность теплообмена пластины, м ²	0,198	0,42
Количество пластин	195	192

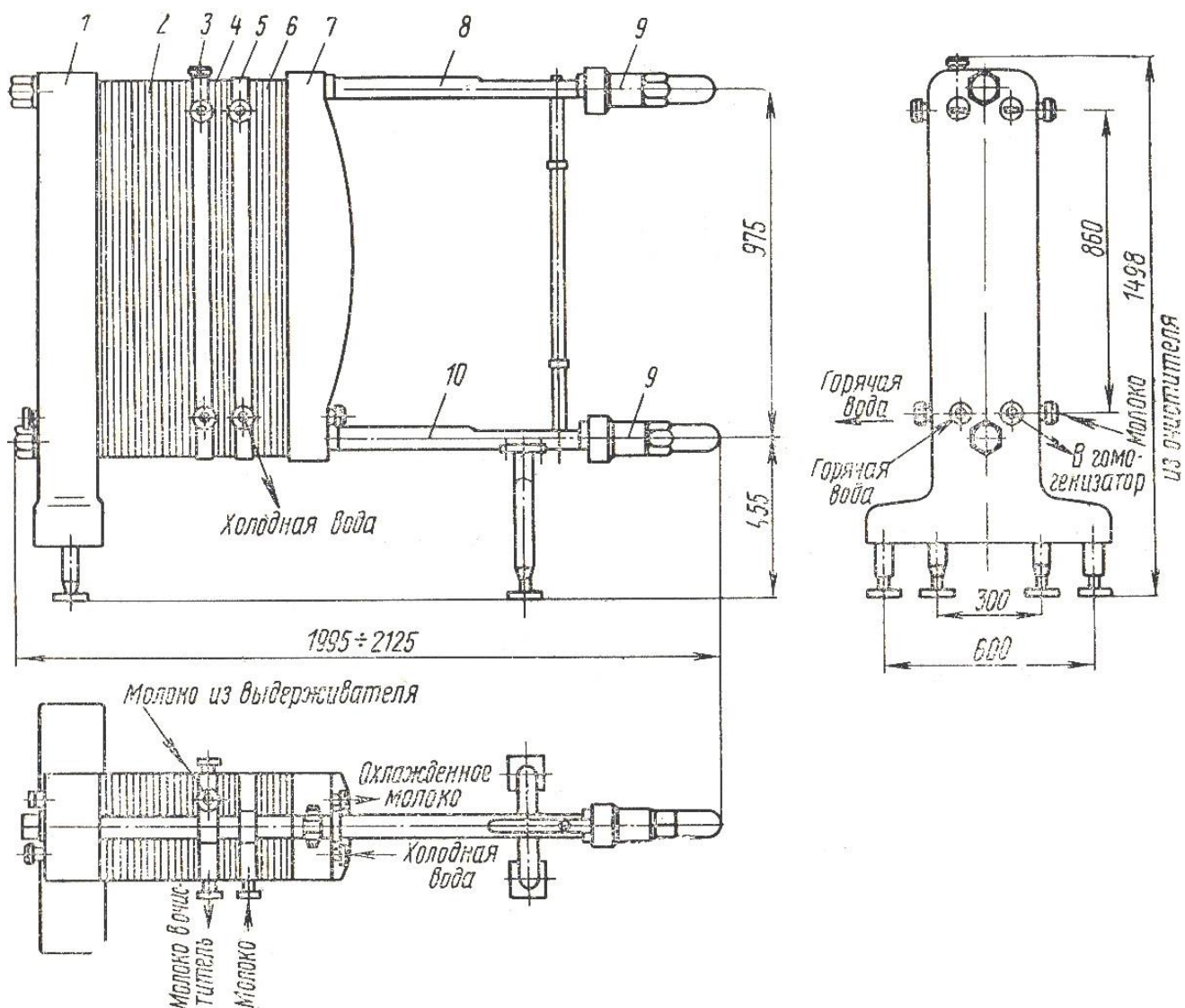


Рис.13. Пластинчатый теплообменник пастеризационно-охладительной установки ОПЛ-5 (ОПЛ-10) для молока при производстве кисломолочных продуктов кефира и сыра: 1- опорная плита; 2,4,6 - пластины секций пастеризации, регенерации и водяного охлаждения; 3,5 - межсекционные плиты; 7- нажимная плита; 8,10 - штанги с накладками; 9-зжимные механизмы

Характеристика теплообменников пастеризационно-охладительных установок
ОПЛ-5 и ОПЖ-10 для молока при производстве кефира и сыра

Показатели	Пастеризационно-охладительная установка	
	ОПЛ-5	ОПЖ-10
Производительность, м ³ /час	5	10
Начальная температура молока, °С	5	5
Производство кефира:		
температура пастеризованного молока, °С	90÷95	90÷95
температура охлажденного молока, °С	22	22
температура горячей воды, °С	95÷98	95÷98
выдержка при температуре пастеризации °С, мин	5	5
Производство сыра:		
температура пастеризованного молока, °С	74÷76	74÷76
температура охлажденного молока, °С	32÷36	32÷36
температура горячей воды, °С	76÷78	76÷78
температура холодной воды, °С	10÷12	10÷12
выдержка при температуре пастеризации °С, мин	5	5
Расход горячей воды, м ³ /час	25	30
Расход холодной воды, м ³ /час	5	10
Коэффициент регенерации теплоты при производстве кефира (сыра)	0,87;(0,6)	0,87;(0,6)
Общая поверхность теплообмена, м ²	21	48,4
Тип пластин	П-2	П-3

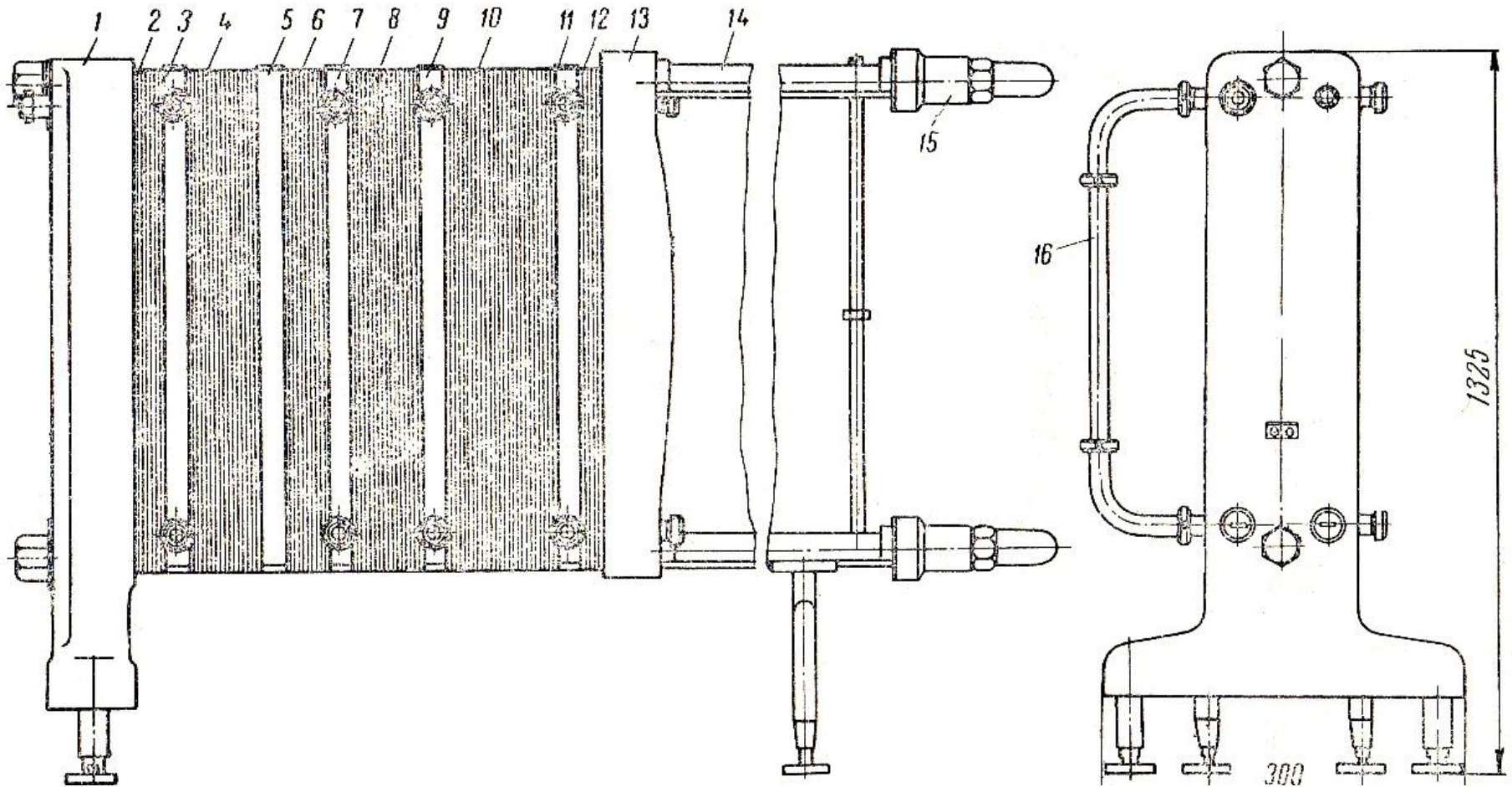


Рис.14. Пластинчатый теплообменник пастеризационно-охладительной установки ОПН-5 для нормализованного молока и сливок: 1-опорная плита; 2,4,6,8,10,12- пластины секций пастеризации сливок (жирностью 30-35%), пастеризации нормализованного молока (жирностью 3,2%), регенерации I, регенерации II, охлаждения ледяной водой и рассолом; 3,5,7,9,11- межсекционные плиты; 13 –нажимная плита; 14- штанга с накладкой;15- зажимной механизм; 16- молокопровод

Таблица 6

Характеристика теплообменника пастеризационно-охладительной установки ОПН-5 для нормализованного молока (жирностью 3,2) и сливок (жирностью 30-35%)

Показатели	Установка ОПН-5
Общая производительность, м ³ /час	5
Производительность по сливкам, м ³ /час	0,4
Коэффициент регенерации теплоты	0,5
Начальная температура молока, °С	5
Температура пастеризации молока, °С	85±2
Температура пастеризации сливок, °С	90±2
Температура охлажденного молока и сливок, °С	4±2
Температура горячей воды, °С	92
Температура ледяной воды, °С	2
Температура рассола, °С	-5
Расход горячей воды, м ³ /час	10
Расход ледяной воды и рассола, м ³ /час	10
Общая поверхность теплообмена, м ²	30,8
Тип пластин	П-2
Поверхность теплообмена пластины, м ²	0,198
Количество пластин	154

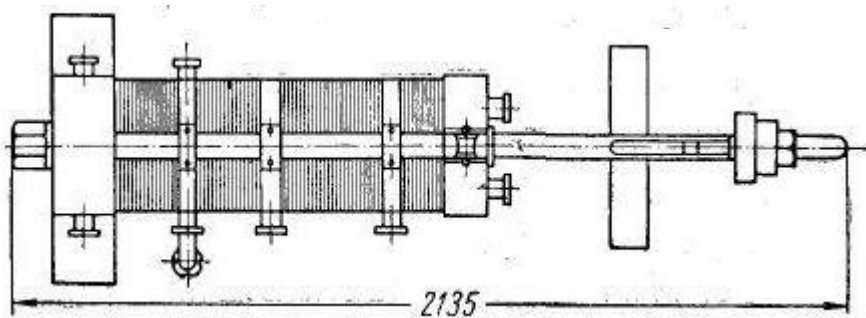
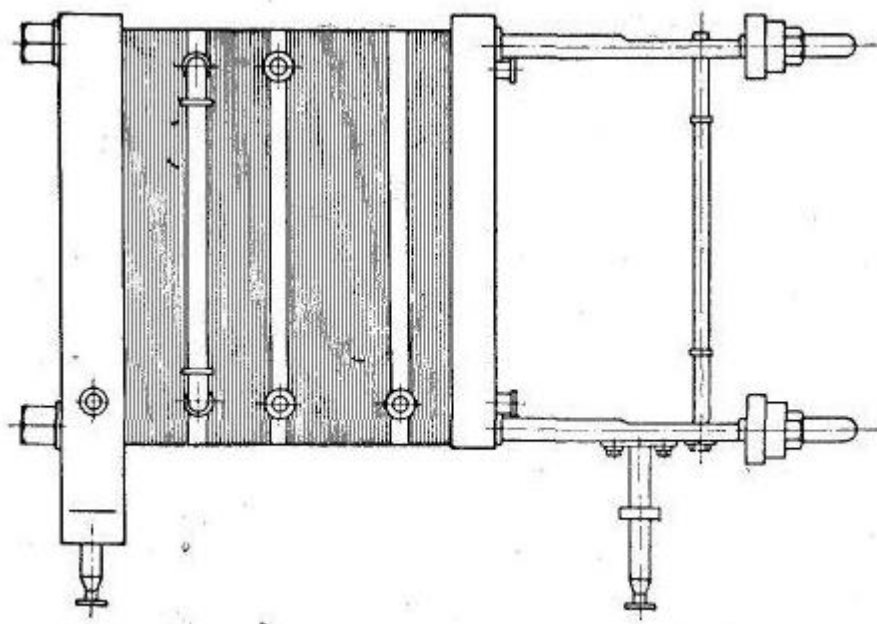


Рис.15. Пластинчатый теплообменник пастеризационно-охладительной установки ОПУ-1 и ОПУ-2 для сливок (жирностью 30-35%), предназначенных для выработки сливочного масла

Таблица 7

Характеристика пастеризационно-охладительных установок ОПУ-1 и ОПУ-2

Основные параметры	Тип установки	
	ОПУ-1	ОПУ-2
Производительность, м ³ /час	1	2
Количество секций	4	4
Начальная температура продукта, °С	5÷10	5÷10
Температура пастеризации, °С	85÷90	85÷90
Температура горячей воды, °С	90÷95	90÷95
Температура охлажденного продукта, °С	3÷4	3÷4
Температура холодной воды, °С	8÷10	8÷10
Температура рассола, °С	-5	-5
Коэффициент регенерации теплоты	0,65	0,65
Расход холодной воды, м ³ /час	3÷4	6÷8
Расход рассола, м ³ /час	2	4
Расход горячей воды, м ³ /час	5	10
Скорость продукта, м/с	0,17	0,17
Скорость горячей воды, м/с	0,68	0,68
Скорость холодной воды, м/с	0,51	0,51
Скорость рассола, м/с	0,34	0,34

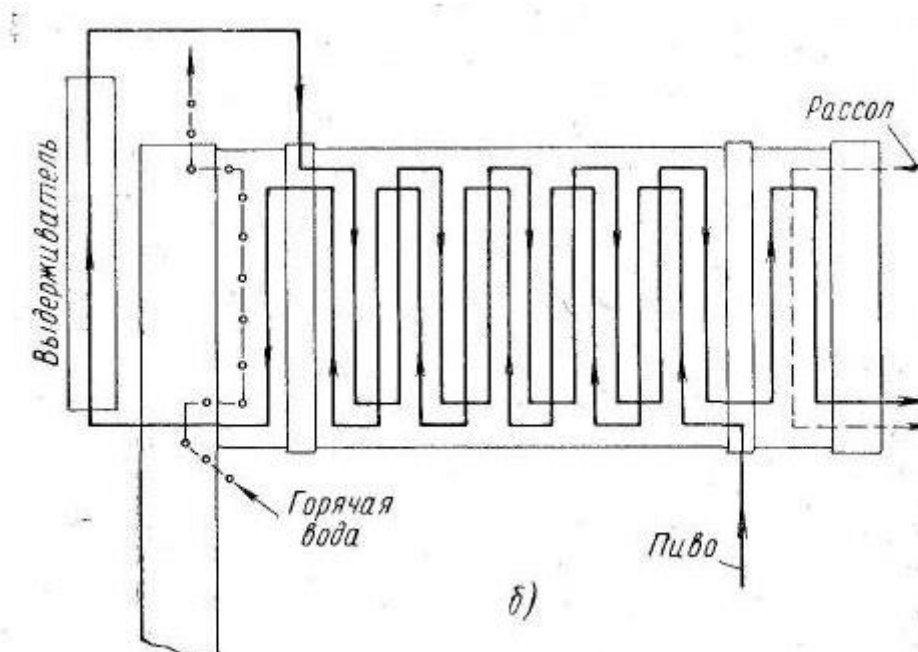
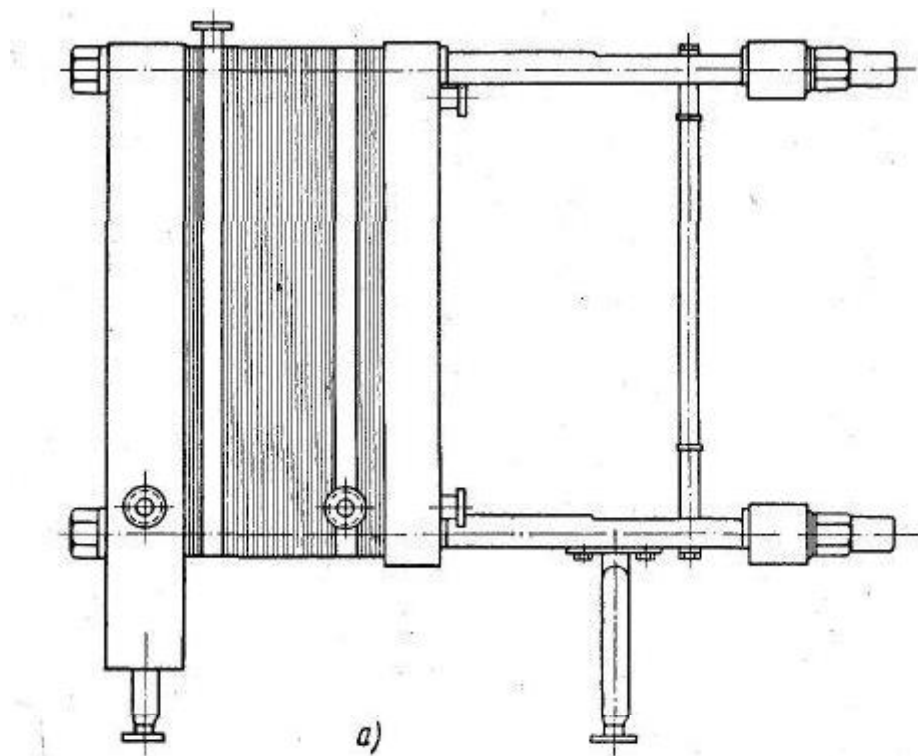


Рис.16. Пластинчатый теплообменник пастеризационно-охладительной установки АПП-3 и АПП-6 для пива: а-общий вид; б-схема

Таблица 8

Характеристика пастеризационно-охладительных установок АПП-3 и АПП-6

Основные параметры	Тип установки	
	АПП-3	АПП-6
Производительность, м ³ /час	3	6
Количество секций	3	3
Начальная температура продукта, °С	0	0
Температура пастеризации, °С	68÷70	68÷70
Температура горячей воды, °С	75÷77	75÷77
Температура охлажденного продукта, °С	0÷1	0÷1
Температура рассола, °С	-5	-5
Коэффициент регенерации теплоты	0,89	0,88
Расход горячей воды, м ³ /час	9	18
Расход рассола, м ³ /час	6	12
Скорость продукта, м/с	0,34	0,34
Скорость горячей воды, м/с	1,03	1,03
Скорость рассола, м/с	0,34	0,34

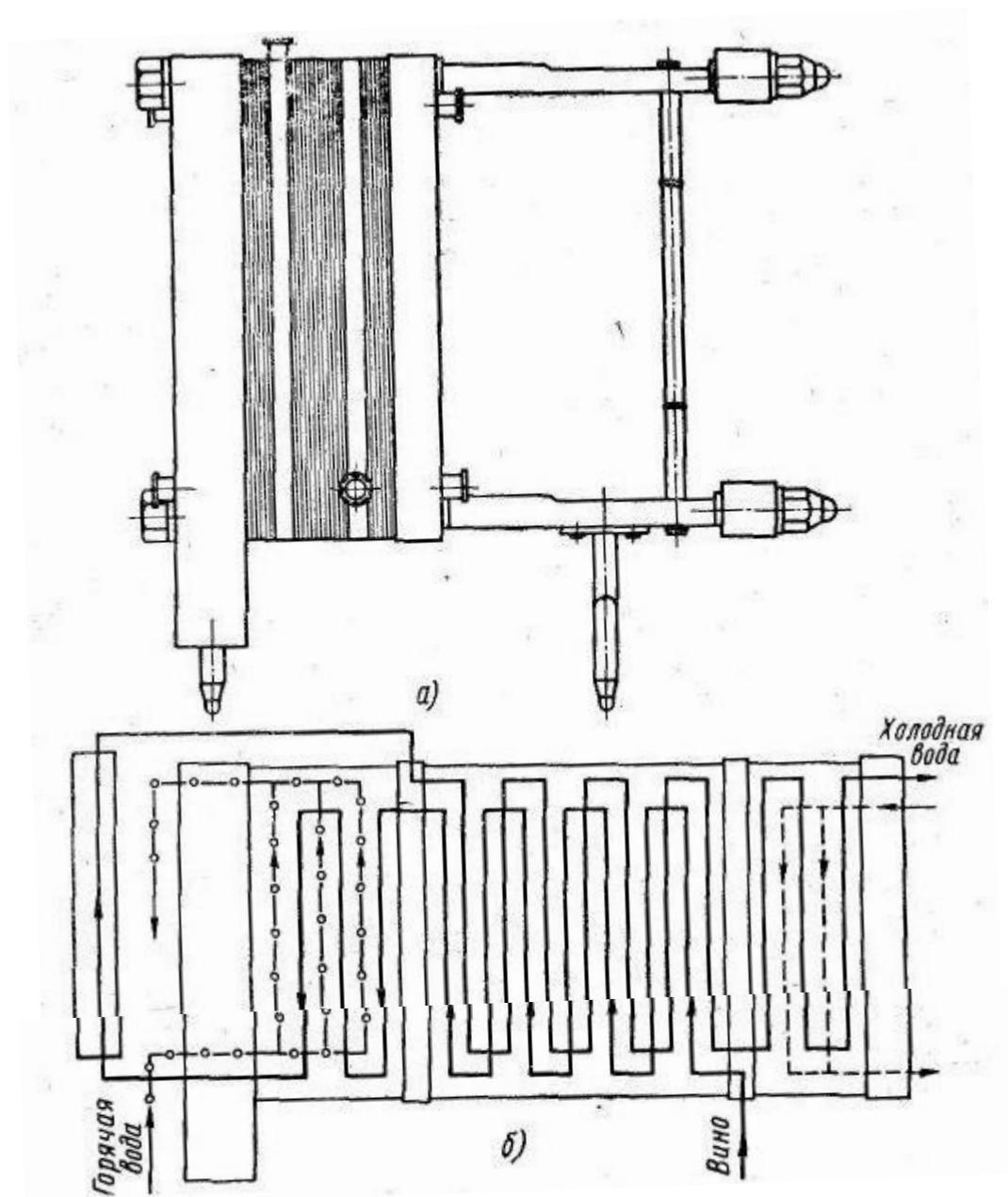


Рис.17. Пластинчатый теплообменник пастеризационно-охладительной установки ВПУ-2,5 и ВПУ-5 для вина: а-общий вид; б-схема

Таблица 9

Характеристика пастеризационно-охладительных установок ВПУ-2,5 и ВПУ-5

Основные параметры	Тип установки	
	ВПУ-2,5	ВПУ-5
Производительность, м ³ /час	2,5	5
Количество секций	3	3
Начальная температура продукта, °С	18	18
Температура пастеризации, °С	83	83
Температура горячей воды, °С	86	86
Температура охлажденного продукта, °С	15	15
Температура холодной воды, °С	8÷10	8÷10
Коэффициент регенерации теплоты	0,8	0,8
Расход горячей воды, м ³ /час	7,5	15
Расход холодной воды, м ³ /час	7,5	15
Скорость продукта, м/с	0,43	0,43
Скорость горячей воды, м/с	0,43	0,43
Скорость рассола, м/с	0,43	0,43

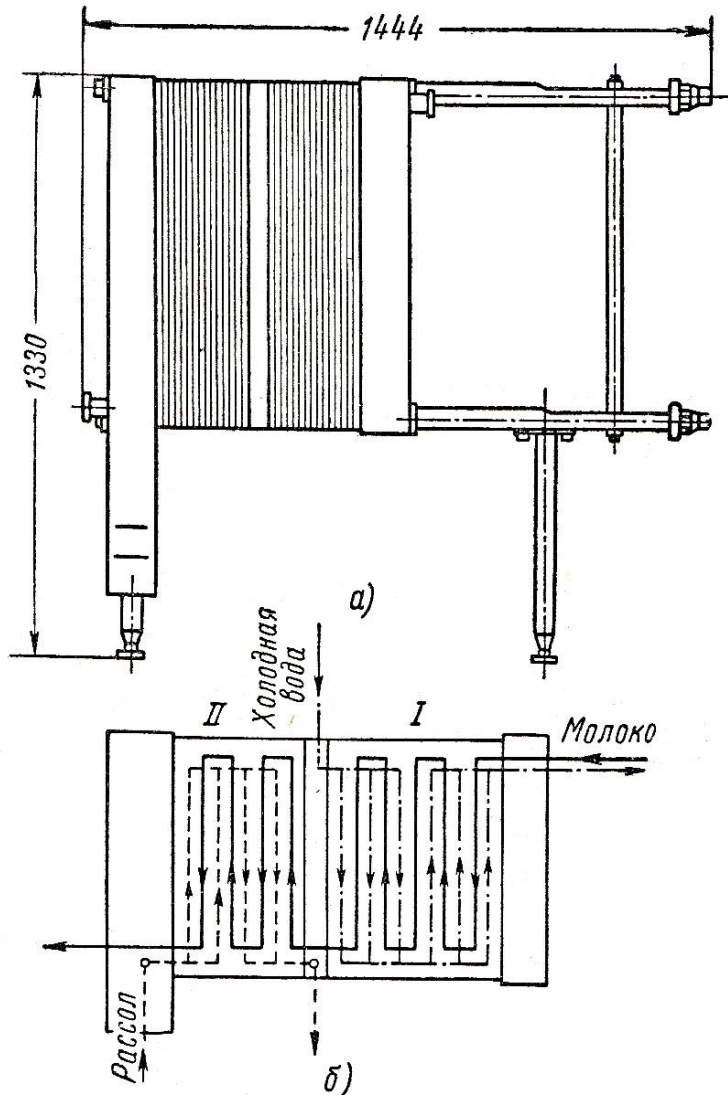


Рис.18. Конструкция установок пластинчатых охладителей: ООТ-М, ООУ-М, ОО1-У10, ООУ-25 для молока и кисломолочных продуктов; АОГМ для пивного сусла; ВОУ-2,5 и ВОУ-5 для вина (1 секция) : а-общий вид; б-схема

Таблица 10

Характеристика охладительных установок ООТ-М, ООУ-М, ОО1-У10,
ООУ-25 для молока и кисломолочных продуктов

Показатели	Охладительная установка			
	ООТ-М	ООУ-М	ОО1-У10	ООУ-25
Производительность, м ³ /час	3	5	10	25
Количество секций	2	2	2	2
Температура продукта, °С:				
до охлаждения,	35	35	20	20
после охлаждения	4±2	4±2	4±2	4±2
Температура, °С:				
холодной воды,	20	20	8-10	8-10
рассола,	-5	-5	-5	-5
ледяной воды	0-1	0-1	0-1	0-1
Расход, м ³ /час:				
холодной воды,	9	15	20	50
рассола или ледяной воды	9	15	20	50
Тип пластин	П-1	П-1	П-1	П-3
Поверхность пластины, м ²	0,146	0,146	0,146	0,42
Скорость продукта, м/с	0,6	0,6	0,62	0,33

Таблица 11

Характеристика охладительных установок АОГМ для пивного сусла;

БОУ-2,5 и БОУ-5 для вина

Показатели	Охладительная установка		
	АОГ-М	БОУ-2,5	БОУ-5
Производительность, м ³ /час	6	2,5	5
Начальная температура продукта, °С	70	18	18
Температура охлажденного продукта, °С	7	-10	-10
Количество секций:			
охлаждение водой,	1	-	-
рассольное охлаждение	1	1	1
Расход воды, м ³ /час	18	-	-
Расход рассола, м ³ /час	12	5	10
Начальная температура воды, °С	до 20	-	-
Начальная температура рассола, °С	-5	-15	-15
Скорость продукта, м/с	0,68	0,35	0,4
Скорость воды, м/с	0,68	-	-
Скорость рассола, м/с	0,45	0,35	0,4

Таблица 12

Основные параметры ленточно-поточных пластин

Параметры	P-5 (П-1)	P-11 (П-2)	P-12	P-13	P-14 (П-3)	P-15	P-16	P-17
Длина, мм	800	1020	1170	890	1170	1370	1240	1980
Ширина, мм	225	315	420	280	416	500	750	750
Толщина стенки, мм	1,2	1,25	1,3	1,25	1,4	1,25	1,25	1,25
Поверхность теплообмена, м ²	0,15	0,2	0,4	0,2	0,42	0,52	0,6	1,2
Расстояние между пластинами, мм	2	3	4	3,5	4	4,3	4,5	4,5
Эквивалентный диаметр канала, м	0,005	0,0056	0,008	0,008	0,008	0,009	0,009	0,009
Площадь поперечного сечения канала, м ²	0,0004	0,0007	0,0015	0,0008	0,0015	0,002	0,0032	0,0032
Диаметр угловых штуцеров, мм	50	50	76	50	76	100	200	200

Теплофизические характеристики молока

t, °C	ρ , кг/м ³	C, Дж/(кг °К)	λ , Вт/(кг °К)	$\mu \cdot 10^3$, Па·с	Pr
10	1032	3870	0,489	2,52	20
20	1029	3890	0,495	1,82	14,3
30	1025	3900	0,5	1,35	10,6
40	1021	3910	0,506	1,1	8,5
50	1016	3870	0,516	0,87	6,5
60	1011	3856	0,518	0,72	5,35
70	1005	3852	0,524	0,63	4,65
80	1000	3850	0,53	0,58	4,2

Таблица 14

Теплофизические характеристики рассола NaCl (22, 5 мас. %)

t, °C	ρ , кг/м ³	C, Дж/(кг °К)	λ , Вт/(кг °К)	$\mu \cdot 10^3$, Па·с	Pr
5	1170	3330	0,56	2,46	14,7
0	1181	3330	0,54	2,98	18,4
-10	1185	3328	0,505	4,57	30,1
-20	1188	3320	0,476	8,85	47,5

Таблица 15

Теплофизические свойства продуктов пивоваренного производства

Продукты	t, °С	ρ , кг/м ³	C, Дж/(кг °К)	λ , Вт/(кг °К)	$a \cdot 10^6$, м ² ·с
Пиво ленинградское					
Сусло неохмеленное	50	1072	3671	0,56	0,142
	80	1056	3726	0,583	0,149
Сусло охмеленное	50	1072	3679	0,57	0,144
	80	1056	3730	0,605	0,154
Готовое пиво	50	1020	3860	0,55	0,14
	80	1020	3873	0,579	0,146
Пиво жигулевское					
Сусло неохмеленное	50	1077	3671	0,56	0,142
	80	1058	3726	0,583	0,149
Сусло охмеленное	50	1072	3671	0,56	0,142
	80	1015	3730	0,605	0,154
Готовое пиво	50	1008	3860	0,55	0,14
	80	1000	3873	0,579	0,146

Таблица 16

Теплофизические свойства некоторых пищевых продуктов при 20⁰С

Продукты	ρ , кг/м ³	C , Дж/(кг ⁰ К)	λ , Вт/(кг ⁰ К)	$a \cdot 10^6$, м ² ·с	$\mu \cdot 10^3$, Па·с
Обезжиренное молоко	1036	3956	0,574	0,114	1,74
Сгущенное молоко	1280	2260	0,267	0,092	1245
Сливки (25 %)	1010	4639	0,36	0,077	8,09
Сметана	1070	3182	0,349	0,102	-
Сыворотка	1027	4082	0,541	0,128	1,65
Масло сливочное	930	2206	0,201	0,098	-
Мука	762	1708	0,122	0,094	-
Сахар	878	1407	0,158	0,128	-
Сыр творожный	1080	2428	0,349	0,133	-
Творог жирный	1060	3265	0,43	0,124	-
Патока	1430	2700	0,394	0,102	-

Учебное издание

Исаев Вадим Николаевич

РАСЧЕТ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ПАСТЕРИЗАЦИОННО-
ОХЛАДИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Учебное пособие

Под редакцией А.Г. Липина

Редактор В.Л. Родичева

Подписано в печать 30.09 2019. Формат 60×84 1/16. Бумага писчая.

Усл. печ.л. 3,72. Уч.-изд.л. 4,13. Тираж 70 экз. Заказ

ФГБОУ ВО “Ивановский государственный
химико-технологический университет”

Отпечатано на полиграфическом оборудовании

редакционно-издательского центра ФГБОУ ВО “ИГХТУ”

153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 7