

УДК 621.1.016:579

Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Бухкало С.И., Перевертайленко А.Ю.

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ПАСТЕРИЗАЦИОННО-ОХЛАДИТЕЛЬНЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ МОЛОКА

В условиях повышения цен на энергоносители, энергосбережение является одной из самых актуальных задач для пищевой промышленности Украины. Эта отрасль промышленности – одна из интенсивных потребителей топливно-энергетических ресурсов, однако, в вопросах внедрения прогрессивных технических решений наблюдается некоторый консерватизм.

В настоящее время большое значение имеет проектирование и разработка новых высокоэффективных энергосберегающих технологических процессов и оборудования для различных производств пищевой промышленности, а именно такой отрасли, как молочная [1]. В связи с этим представляет интерес рассмотреть более подробно процесс переработки молока.

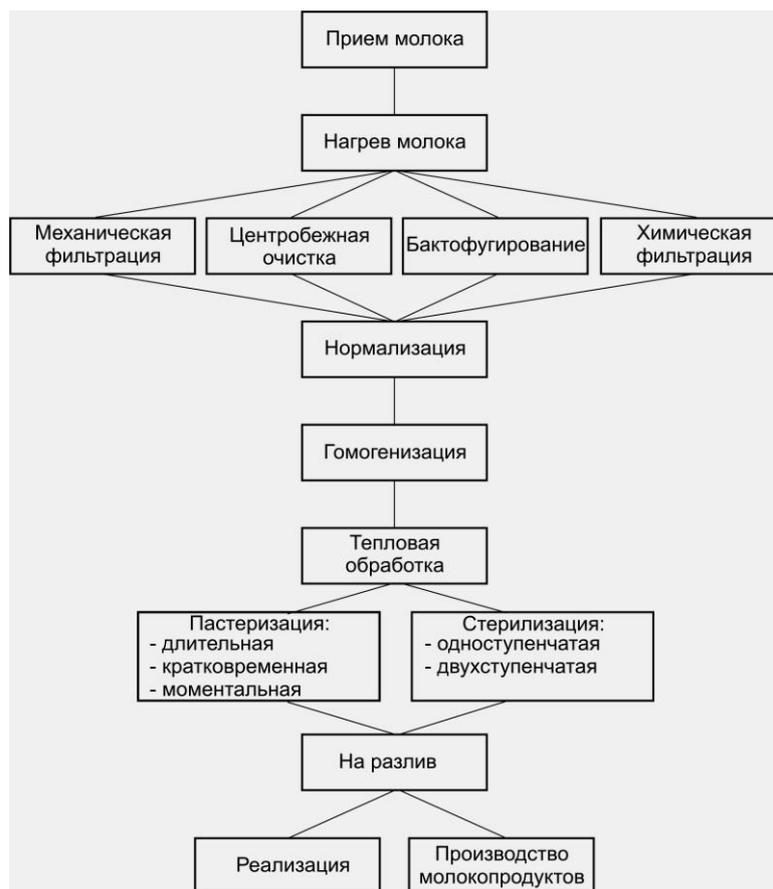


Рисунок 1 – Функциональная схема производства молока

Рынок цельного молока подразделяется на два основных сегмента – разливное и пакетированное. Потребляет Украина молока приблизительно 2 млрд. л за год или более чем 40 л на душу населения. Сегмент фасованного молока (20 %) включает в себя

пастеризованное, топленое и обработанное при высокой температуре (Т-молоко). Первое имеет срок реализации до одной недели, последнее – несколько месяцев.

Технология молока – сложный по техническому исполнению многофункциональный процесс (рис. 1), постоянно развивающийся и совершенствующийся. Тепловая обработка молока – обязательная технологическая операция в производстве различных молочных продуктов, являющаяся иногда основной (например, при выработке пастеризованного молока).

Пастеризацией называется способ тепловой обработки молока в интервале от 63 °С до температуры, близкой к точке кипения. Цель пастеризации – уничтожить большую часть обычной микрофлоры и всю патогенную микрофлору при максимальном сохранении пищевой и биологической ценности молока. Пастеризация позволяет продлить срок хранения молока, а при изготовлении молочных продуктов, требующих развития специальных культур, создает благоприятные условия для их роста.

В промышленности применяют несколько режимов пастеризации молока. Длительная пастеризация ведется при температуре 63-65 °С с выдержкой 30 мин, кратковременная – при температуре 72-76 °С с выдержкой 15-20 с и моментальная – при температуре 85 °С и выше без выдержки. Установлена функциональная зависимость продолжительности пастеризации τ от температуры T , выражающаяся уравнением Дальберга-Кука.

Эффективность действия пастеризационной установки определяется степенью подавления патогенной микрофлоры. Подавление непатогенных форм является необходимым попутным результатом процесса. Процесс подавления микроорганизмов при определенной температуре T в течение τ сек называется длительной пастеризацией, или пастеризацией с выдержкой. Подавить микроорганизмы можно также действием переменной температуры без всякой выдержки, когда молоко, двигаясь по каналу аппарата, нагревается в потоке. При этом, разумеется, что процесс длится определенное время, в течение которого температура постоянно изменяется. Эти два процесса – с выдержкой и без выдержки – применяются в промышленности в чистом виде или чаще в комбинации их.

Исследования процесса пастеризации производились с целью выяснения длительности необходимого действия при постоянной температуре. В результате теплового воздействия подавляются патогенные микроорганизмы и, таким образом, достигается важный положительный результат. Однако при этом могут быть и нежелательные результаты. Дело в том, что молоко – очень сложная система, состоящая из различных компонентов, которые в свою очередь также отличаются сложностью состава, легко претерпевает изменения, хорошо известные и появляющиеся при кипячении молока и других операциях, осуществляемых при высоких температурах.

В частности, при нагреве молока до известных температур уменьшается отстой сливок. Изменение скорости отстоя сливок является первым признаком нагрева молока до определенных температур. Между линиями, определяющими условия подавления микроорганизмов рис. 2а (кривые 1-4), и линиями, отражающими условия физико-химических изменений в молоке (кривые 5-8), расположена область, где любая точка соответствует режиму пастеризации, при котором микроорганизмы подавляются, а молоко сохраняет свои первоначальные качества.

Наличие такой промежуточной зоны свидетельствует о том, что можно выбрать такой режим пастеризации, при котором почти не изменятся первоначальные качества молока. Форма кривых на рис. 2 заставляет полагать, что они могут быть охарактеризованы уравнением логарифмического вида. Это предположение подкрепляется тем об-

стоятельством, что пастеризация есть тепловой процесс, а тепловые процессы, как известно [2], выражаются логарифмическими функциями. Процесс пастеризации молока может протекать в трёх режимах и может быть описан соответствующими функциональными зависимостями продолжительности пастеризации от температуры.

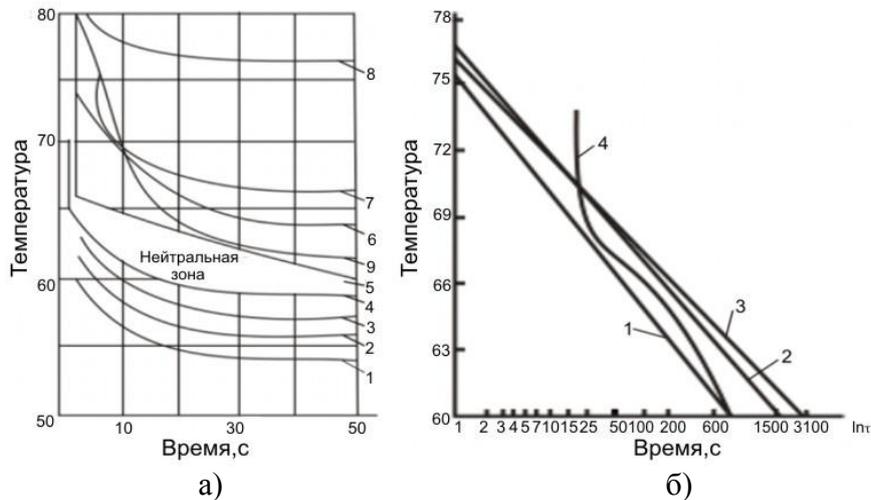


Рисунок 2 – Зависимость длительности пастеризации от температуры:

а) кривые 1-4 для подавления различных видов микроорганизмов; кривые 5-8 – изменение физико-химических свойств молока (5 – ферментов, 6 – альбумина, 7 – изменение вкуса, 8 – жира, сахаров, солей, казеина); б) кривые 1-3 соответственно для уравнений 1.1, 1.2 и 1.3; 4 – для производственных режимов в нейтральной зоне

Первый режим пастеризации (кривые 1-4), характеризует условия подавления микроорганизмов:

$$\ln \tau = 33,5433 - 0,4443 \cdot T. \quad (1)$$

Второй режим пастеризации (кривые 5-8) характеризует условия сохранения физико-химических свойств молока:

$$\ln \tau = 40,764 - 0,543 \cdot T. \quad (2)$$

Третий режим пастеризации (нейтральная зона), характеризует условия, при которых микроорганизмы подавляются, а молоко сохраняет свои физико-химические свойства. Это означает, что можно выбрать такой режим пастеризации, при котором первоначальные качества молока изменяются незначительно:

$$\ln \tau = 36,84 - 0,48 \cdot T. \quad (3)$$

Режимы пастеризации проверены в производственных условиях, полученные значения T и τ , вычисленные по формуле 3 приведены в таблице 1.

Если по горизонтальной координате откладывать не τ , а $\ln \tau$, а по вертикальной – температуру T , то уравнения (1-2) будут изображены прямыми линиями. На рис. 2б представлены все три линии, характеризующие указанные процессы, причем линия режимов пастеризации 2, выраженных формулой (3), проходит дальше от линии подавле-

ния бактерий туберкулеза и ближе к линии отстоя. Изменение отстоя сливок – приближение к линии отстоя и даже выход за ее пределы – это прием, к которому на производстве приходится часто прибегать.

Таблица 1 – Режимы пастеризации проверенные в производственных условиях

Температура, °С	76	74	72	71,1	70	68	66	64	62	61,1
Время, сек	1,4	3,7	9,8	15	25,6	67	174	455	1188	1930

Пастеризуемое молоко должно быть предварительно тщательно очищено фильтрацией или центрифугированием от посторонних примесей, так как подавлению подлежат микроорганизмы, взвешенные в молоке. При невыполнении требований, предъявляемых к качеству сырья, эффективность пастеризации снижается. В процессе пастеризации каждая частица молока должна подвергаться полному воздействию теплового режима. Воздействие тепла на микроорганизмы косвенное, нагреву подвергается молоко и только при его посредстве тепло сообщается микроорганизмам.

Исследование этого действия показывает, что через определенный период патогенные клетки не проявляют жизнедеятельности, если температура в течение времени τ удерживается на определенном уровне. Время τ назовем временем необходимого и достаточного бактерицидного действия. При достаточной суммарной величине этих воздействий клетка гибнет или приводится в такое состояние, что она уже не может нанести какой-либо вред организму, наделенному силами сопротивляемости, присутствующими в его крови. Режимы пастеризации, установленные по этой формуле гарантируют микробиологическую чистоту молока.

Первый пастеризатор молока непрерывного действия был разработан и внедрен в 1890 году шведской компанией AB Separator [3]. Аппарат состоял из верхней секции для нагрева молока и нижней секции для его охлаждения. Каждая секция состояла из набора полых конических дисков, подсоединенных к центральной трубе. Внутри дисков по трубе подавалась нагретая паром вода для верхней секции, и холодная вода для нижней секции. Молоко подавалось наверх и омывало поверхности дисков с внешней стороны, стекая вниз. Между секциями была установлена емкость выдерживателя, куда молоко поступало с температурой около 65 °С, а после секции охлаждения молоко поступало в сборник, расположенный в нижней части аппарата. Как теплообменный аппарат, подобное устройство обладало невысокой эффективностью. Несмотря на то, что подобные аппараты выпускались недолго, их можно считать прототипом современных пастеризационно-охладительных пластинчатых теплообменных аппаратов. С целью повышения экономичности пастеризаторов молока компанией AB Separator в 1917 году был разработан регенератор, в котором молоко, поступающее на пастеризацию, нагревалось молоком после пастеризации. Это позволило сократить расход пара на пастеризацию на 40-50 %.

В 1923 году компания APV (Великобритания) начала изготавливать регенеративные пастеризаторы (пастеризаторы с секцией регенерации) на базе пластинчатых теплообменников, разработанных Р. Зелигменом [4, 5]. К 1930 году окончательно сформировалась конструкция пастеризационно-охладительного теплообменного аппарата как моноблока, выполненного на единой раме с промежуточными плитами, разделяющими пакет пластин на соответствующие секции. Подобные аппараты, например, производ-

ства компании Bergerdorf Eisenwek (Германия) имели степень регенерации до 69 %, производительность для аппаратов с пластинами типоразмера 1 по молоку составляла 500-3000 л/ч, а для аппаратов с пластинами типоразмера 2 – от 1000 до 12000 л/ч. Пластины – фрезерованные канальчатые из бронзы, чередующиеся с плоскими тонкими пластинами [3]. Штампованные пластины из нержавеющей стали с волнистым профилем, образующие каналы ленточно-поточного типа, были внедрены компанией AV Separator в 1944 году под обозначением P12 [3].

Применение подобного типа гофрировки позволило значительно интенсифицировать турбулентность и теплоперенос в каналах пластинчатых пастеризационно-охладительных теплообменников.

Подобная конструкция пластин под обозначением П-1, П-2, П-3 была реализована в СССР для пластинчатых теплообменных аппаратов пастеризационно-охладительных установок для молока и сливок серии ОПУ Болшевским машиностроительным заводом. Некоторые подобные установки находятся в эксплуатации на предприятиях молочной промышленности Украины и в настоящее время.

Анализ данных, приведенных Н.В. Барановским в работе [5] для данной серии аппаратов, позволяет кратко обобщить их в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики пластинчатых пастеризаторов серии ОПУ

Характеристика	Тип установки					
	ОПУ-1	ОПУ-2	ОПУ-3М	ОПУ-5М	ОПУ-10	ОПУ-15
Тип канала	ленточно-поточный	ленточно-поточный	ленточно-поточный	ленточно-поточный	ленточно-поточный	ленточно-поточный
Площадь поверхности пластины, м ²	0,15	0,15	0,15	0,15	0,2	0,42
Производительность по продукту, л/ч	1000 (сливки)	2000 (сливки)	3000 (молоко)	5000 (молоко)	10000 (молоко)	15000 (молоко)
Габариты теплообменника, мм, – длина; – ширина; – высота	21000 700 1475	2200 700 1475	2050 700 1470	2340 700 1470	3700 700 1505	4300 805 1690

Степень регенерации установок ОПУ-10 достигает 82 %, установок ОПУ-15 – до 85 %. Для охлаждения применяются вода и рассол, либо ледяная вода.

В настоящее время в молочной промышленности Украины применяются пастеризационно-охладительные установки на базе пластинчатых аппаратов серии ОКЛ, разработанных НПО «Мир». Краткие характеристики аппаратов приведены в таблице 3 (данные Большевского ПО «Поток» и Альфа Лаваль Поток).

На рисунке 3 представлена схема пастеризационно-охладительной установки А1-ОКЛ-3, пластинчатый аппарат которой состоит из секций пастеризации, регенерации и охлаждения ледяной водой. В ряде случаев используют охлаждение рассолом (в основном, растворы CaCl₂, NaCl), либо двухсекционную охлаждающую часть: вода и рассол.

Таблица 3 – Характеристики пластинчатых пастеризаторов серии ОКЛ

Характеристика	Модель				
	A1-ОКЛ-3	A1-ОКЛ-5	A1-ОКЛ-10	A1-ОКЛ-15	A1-ОКЛ-25
Тип канала	сетчато-поточный	сетчато-поточный	сетчато-поточный	сетчато-поточный	сетчато-поточный
Площадь поверхности пластины, м ²	0,2	0,2	0,2	0,55	0,55
Производительность по продукту, л/ч	3000	5000	10000	15000	25000
Степень регенерации	85	88	85	90	90
Крепление прокладок	клеевое				

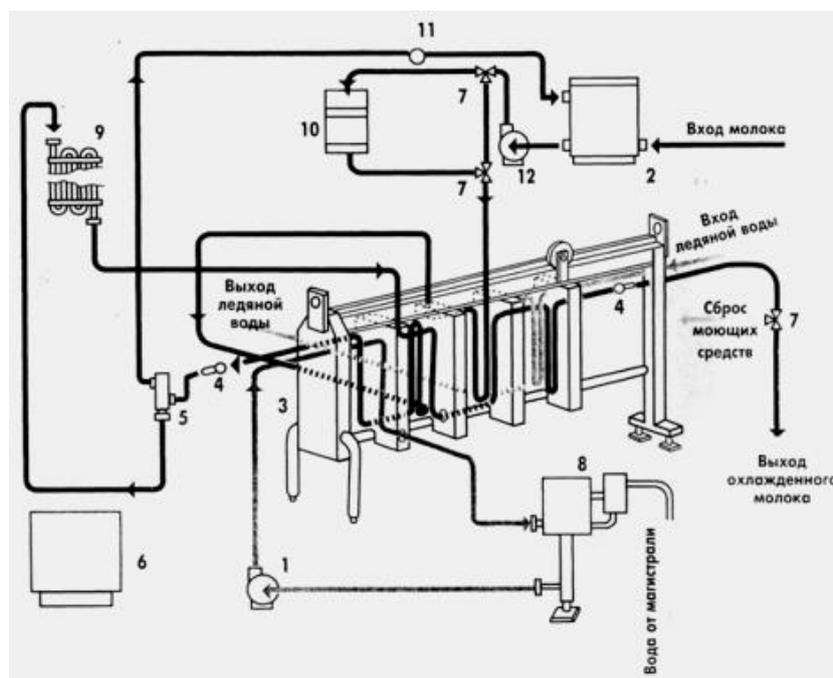


Рисунок 3 – Схема пастеризационно-охладительной установки для молочных продуктов
 1 – насос водяной; 2 – вентиль; 3 – аппарат; 4 – термометр; 5 – клапан переключающий; 6 – щит управления; 7 – кран; 8 – тройник; 9 – выдерживатель; 10 – сепаратор;
 11 – регулятор потока; 12 – насос молочный; 13, 14 – приемный бак

Сырое молоко из резервуара для хранения с температурой 5...10 °С поступает в уравнивательный бак 13, который за счет клапанно-поплавкового устройства заполняется до определенного уровня. Центробежным насосом 12 из уравнивательного бака через стабилизатор потока молоко подается на секцию регенерации пластинчатого аппарата 3, где нагревается теплом молока, поступающего из секции пастеризации. Нагретое в секции регенерации молоко поступает в секцию пастеризации, где нагревается до тем-

пературы пастеризации (76...80 °С) горячей водой, в свою очередь нагреваемой паром, поступает в выдерживатель 9, а затем в секцию регенерации, где отдает тепло сырому молоку, поступающему в секцию регенерации пластинчатого аппарата. Затем охлажденное молоко поступает в секцию охлаждения, где охлаждается ледяной водой до температуры 2-6 °С и выходит из пластинчатого аппарата 3. В случае применения комбинированного водно-рассольного охлаждения молоко последовательно проходит секцию водяного и рассольного охлаждения.

В последнее время в качестве низкотемпературного хладоносителя вместо рассолов начинают применяться пропиленгликоли, не обладающие коррозионным воздействием на материалы оборудования.

Методики расчетов пластинчатых пастеризационно-охладительных аппаратов достаточно подробно описаны в работах [2,5] и являются частным случаем общей методики расчета пластинчатых теплообменных аппаратов.

Экономичность пастеризационно-охладительного пластинчатого аппарата в основном зависит от правильного выбора температур пастеризации при заданной (выбранной) степени регенерации тепла.

Таблица 4 – Расчет температур пастеризационно-охладительной установки

Температура в зоне	Расчетная формула
Молоко на входе в ПТА	t_1 – дано
Пастеризации молока	t_2 – дано
Разность температур в секции регенерации	$\Delta t_1 = (1 - e) \cdot (t_2 - t_1)$
Очистки молока	t – дано
Пастеризованного молока в секции регенерации	$t_4 = t_8 + \Delta t_1$
Молока на выходе из секции регенерации	$t_3 = t_2 - \Delta t_1$
Пастеризованного молока на выходе из секции регенерации	$t_5 = t_1 + \Delta t_1$
Горячей воды в секции пастеризации	t_{wu} - дано
Воды на выходе из секции пастеризации	$t_{wi} = t_{wu} - \frac{c_m}{n \cdot c_w} (t_2 - t_3)$
Молоко на выходе из ПТ	t_7
Молоко на выходе из секции охлаждения водой	$t_6 = t_5 - \frac{t_5 - t_7}{2}$
Холодная вода на входе в ПТ	t_{vu} – дано
Холодная вода на выходе из ПТ	$t_{vi} = \frac{c_m}{n_2 \cdot c_v} (t_5 - t_6) + t_{vu}$
Рассол на входе в ПТ	t_{ru} - дано
Рассол на выходе из ПТ	$t_{ri} = \frac{c_m}{n_3 \cdot c_p} (t_6 - t_7) + t_{ru}$

Перед началом расчета полезно определить температуры молока, а также горячих и холодных утилит в характерных точках пастеризационно-охладительного аппарата.

рата, то есть задать его температурную программу. Пример задания такой программы приведен в таблице 4 (e – степень регенерации; n_1, n_2, n_3 – кратность циркуляции горячей и холодной воды, рассола соответственно) [6].

В настоящее время пластинчатые теплообменники компонуются из пластин, по крайней мере, двух вариантов, которые отличаются углом наклона гофр к вертикальной оси пластины. Пластины с большим углом наклона гофр образуют каналы с большей теплоотдачей от потока (к потоку), но и с большим гидравлическим сопротивлением, соответственно пластины с меньшим углом наклона образуют каналы с меньшими значениями вышеупомянутых режимных параметров.

Таблица 5 – Технические данные для теплообменников типа FrontLine™

Характеристика	Тип		
	Front 6	Front 8	Front 10
Тип канала	сетчато-поточный	сетчато-поточный	сетчато-поточный
Площадь поверхности пластины, м ²	0,18	0,38	0,62
Присоединительные диаметры штуцеров, мм	51	76	76/101,6
Габариты теплообменника, мм			
длина	1028-2548	1372-3783	1402-5002
ширина	520	670	830
высота	1420	1850	2160
Производительность по продукту, л/ч: пастеризация	15000	35000	65000
охлаждение	15000	35000	65000
Максимальная пропускная способность по воде, л/ч	30000	75000	130000
Крепление прокладок	бесклеевое	бесклеевое	бесклеевое

Комбинированная компоновка пакета из пластин двух типов позволяет более полно использовать располагаемый напор на продвижение потоков, что дает возможность снизить ходовость аппаратов и сэкономить площадь поверхности теплопередачи. Методика расчета пластинчатых аппаратов с различными типами каналов приведена в [7]. Современные пастеризационно-охладительные пластинчатые аппараты конструируются с учетом возможности компоновки пластинами различных типов.

Примерами подобных аппаратов являются пластинчатые теплообменники серии FrontLine™, Base Line производства фирмы ALFA-LAVAL (Швеция) [8]. Аппараты FrontLine™ являются высокоэффективными пластинчатыми теплообменниками с экономичным использованием рамы. Они используются для всех процессов тепловой обработки молока. Характеристики этих аппаратов приведены в таблице 5.

Пластинчатые охлаждающие и пастеризационные аппараты BaseLine основаны на типоразмерах пластин для аппаратов общего назначения, и могут использоваться для пастеризации небольших объемов продукта. Характеристики аппаратов BaseLine приведены в таблице 6.

Степень регенерации аппаратов FrontLine™ и BaseLine составляет 90-94%.

Таблица 6 – Технические данные для теплообменников типа BaseLine

Характеристика	M3 Base	M6 Base	M10 Base
Тип канала	сетчато-поточный	сетчато-поточный	сетчато-поточный
Площадь поверхности пластины, м ²	0,032	0,14	0,22
Присоединительные диаметры штуцеров, мм	25	51	76/101,6
Габариты теплообменника, мм, длина	204-500	580-1430	710-2310
ширина	180	300	400
высота	545	855	995
Производительность по продукту, л/ч:			
пастеризация	–	4500	6000
охлаждение (нагрев)	4500	16000	65000
Максимальная пропускная способность по воде, л/ч	8800	35000	130000
Крепление прокладок	бесклеевое	бесклеевое	бесклеевое

Пластинчатые аппараты для тепловой обработки молока другого европейского производителя – фирмы Schmidt KG (Германия) также komponуются из пластин с разным углом наклона гофр. Краткие технические характеристики пластинчатых теплообменников серии SIGMA приведены в таблице 7 [9].

Таблица 7 – Характеристики пластинчатых аппаратов SIGMA

Характеристики	Типоразмер					
	Sigma SI 7	Sigma SI 9	Sigma SI 17	Sigma SI 26	Sigma SI 37	Sigma SI 66
Применение для пастеризационных установок	+	+	+	+	+	+
Тип канала	сетчато-поточный					
Площадь поверхности пластины, м ²	0,056	0,092	0,133	0,245	0,345	0,655
Производительность по продукту, л/ч	200-40000					
Степень регенерации, %	92	92	92	92	92	92

Таким образом, применение прогрессивных технических решений для создания современных пластинчатых пастеризационно-охладительных аппаратов для молочной

промышленности позволило повысить их эффективность и производительность, не снижая компактности этих аппаратов. Подобные аппараты являются существенным средством энергоэффективной интеграции тепловых процессов на предприятиях молочной промышленности.

Литература

1. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л. Л., КАПУСТЕНКО П. А., БУХКАЛО С. И., ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО А.Ю. Применение энергосберегающего теплообменного оборудования в молочной промышленности // Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. №2. – С. 18-21.
2. Кук Г.А. Процессы и аппараты молочной промышленности. М.: Пищевая промышленность, 1973.–768 с.
3. В. Magnusson. The origins and evolution of the Alfa-Laval plate heat exchanger. In: “The Story of the Alfa-Laval Plate Heat Exchanger and Spiral Heat Exchanger”, Norstedts Tryckeri, Stockholm, 1985, p. 1-8.
4. G.A.Dummett. Plattapparater som Värmeväxlare. “Focus”, 1959, Nr. 2, 1-10.
5. Н.В.Барановский. Пластинчатые теплообменники пищевой промышленности. М., Машиностроение, 1962.
6. S.Stanišič, M.Medjevič. Postupak pri proračunu pločatih rasmenjivača toplote. “Mljekarstvo”, 1980, 30(10), 307-314.
7. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л. Л., КАПУСТЕНКО П. А., ХАВИН Г. Л., АРСЕНЬЕВА О. П. Пластинчатые теплообменники в промышленности. Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. 232 с.
8. ALFA LAVAL. Материал фирмы РС 66086GB2003-04.
9. Материалы фирмы TENEZ, 2004.

УДК 621.1.016:579

ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.О., БУХКАЛО С.І., ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО О.Ю.

ДО ПИТАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ПАСТЕРИЗАЦІЙНО-ОХОЛОДЖУЮЧИХ ПЛАСТИНЧАСТИХ АПАРАТІВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ МОЛОКА

В статті висвітлюються проблеми енергозбереження у харчовій промисловості. Розглянуті питання модернізації підприємств молочної промисловості за допомогою використання вискоефективного пластинчастого теплообмінного устаткування. Наведені дані о можливості встановлення апаратів такого класу на стадіях пастеризації та стерилізації молочних продуктів. Зроблені висновки про можливість ефективної інтеграції теплових процесів.