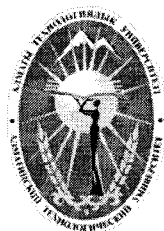


ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

АЛМАТЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТИ
АЛМАТИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ALMATY TECHNOLOGICAL UNIVERSITY

ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТОҢАЗЫТУ АКАДЕМИЯСЫ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА
INTERNATIONAL ACADEMY OF REFRIGERATION



V ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ҚАЗАҚСТАН-ТОҢАЗЫТУ 2015»
V МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«КАЗАХСТАН-ХОЛОД 2015»
V INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE
«KAZAKHSTAN-REFRIGERATION 2015»

Конференция баяндамаларының жинағы

19 ақпан, 2015 ж.

Сборник докладов конференции

19 февраля 2015 г.

Proceedings of the Conference

February 19, 2015

Алматы, 2015

УДК 621.56/59 (063)
ББК 31.397
К14

Сборник докладов подготовлен под редакцией доктора химических наук,
академика **Кулажанова К.С.**

Редакционная коллегия:

Цой А.П., Кизатова М.Ж., Бараненко А.В.,
Шлейкин А.Г., Андреева В.И. (ответ. секретарь)

К14 Казахстан-Холод 2015: Сборник докладов международной научно-технической конференции (19 февраля 2015 г.) – Алматы: АТУ, 2015. – 152 с.

ISBN 978-601-263-312-2

В докладах представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований ученых и специалистов Казахстана, Германии, России, Японии и Украины по направлениям: теплохладоснабжения, кондиционирования и экологии.

Сборник рассчитан на специалистов и ученых, работающих в областях пищевой, химической, нефтеперерабатывающей промышленности, а также гостиничном бизнесе и спортивных комплексах.

УДК 621.56/59(063)
ББК 31.397

ISBN 978-601-263-312-2

©АТУ, 2015

УДК 628.161.045.5:004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ОПРЕСНЕНИИ ВОДЫ ВЫМОРАЖИВАНИЕМ

*О.Б. Васылив, к.т.н., доцент, Е.А. Коваленко, д.т.н., с.н.с.,
С.В. Иценко ассистент, С.В. Фуркало, аспирант
Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, Украина
E-mail: oleg_vas@ukr.net*

Одним из способов опреснения и обессоливания воды является вымораживание. К преимуществам данного способа относятся низкая энергоемкость процесса кристаллизации воды из солевого раствора, совмещение в одном процессе нескольких стадий водоподготовки, уникальность свойств вымороженной воды, возможность получения опресненной воды необходимого минерального состава без дополнительного ее кондиционирования, отсутствие необходимости в специальной предварительной очистке воды перед опреснением, возможность использования энергии плавления льда как для потребностей самой установки, так и для других задач производства [1–6].

Вместе с тем, есть и проблемы, которые пока не удается эффективно решить. Одной из них является недостаточная степень опреснения воды из-за захвата части высокоминерализованного маточного раствора растущей кристаллической фазой. Именно поэтому перед плавлением вымороженной фазы необходимо осуществлять ее сепарирование, зачастую энергоемкий и продолжительный процесс, или дополнительно опреснять воду с помощью других способов [1–6].

На решение указанной выше проблемы направлена сегодня деятельность ученых, инженеров, технологов. Общей целью является разработка новых и усовершенствование существующих способов и конструкций вымораживающих установок, позволяющих повысить количество и качество опресненной воды, а также снизить затраты энергии на весь технологический процесс водоподготовки.

Для достижения такой цели нами предложен и реализован на экспериментальной установке усовершенствованный способ опреснения воды вымораживанием [7, 8]. Способ предусматривает сначала интенсивное охлаждение высокоминерализованного раствора до температуры, при которой начинается образование кристаллов льда на внешней стороне охлаждаемой поверхности, погруженной в раствор. Далее интенсивность охлаждения раствора резко уменьшают путем повышения температуры хладоносителя в кристаллизаторе до уровня, при котором величина переохлаждения раствора перед кристаллизацией из него воды не превышает 0,6 ... 1 °С. Поскольку вымораживание воды из раствора приводит к повышению в нем концентрации растворенных веществ, а увеличение толщины растущего льда – к увеличению его термического сопротивления, то весь дальнейший процесс опреснения воды сопровождается плавным понижением температуры хладоносителя в кристаллизаторе (рис.1). Но при этом величина переохлаждения раствора поддерживается прежней. На практике реализация такого способа возможна лишь при автоматическом регулировании температуры хладоносителя в кристаллизаторе по заданному алгоритму, индивидуально подобранному для раствора в зависимости от концентрации растворенных в нем веществ [9]. Такие особенности предложенного способа были учтены при разработке экспериментальной опреснительной установки, принципиальная схема которой представлена на рис.2, а конструкция узла, где осуществляется вымораживание воды из раствора – на рис.3.

Работа установки осуществляется следующим образом. В емкость 7, с размещенными в ней трубчатыми кристаллизаторами 6, подается раствор для опреснения. Промежуточный теплоноситель

охлаждается в теплообменнике 1 и поступает в ресивер 2. При этом отвод теплоты от промежуточного теплоносителя может осуществляться холодильным агентом, который кипит в испарителе низкотемпературной холодильной машины (на рис. 2 не показана). Далее через трехходовой клапан 3 (в зависимости от его положения) теплоноситель поступает в кристаллизаторы 6, а затем возвращается в теплообменник 1, или минуя кристаллизаторы сразу движется в теплообменник 1. Циркуляция промежуточного теплоносителя осуществляется с помощью циркуляционного насоса 5 с байпасной магистралью, на которой установлен ventиль 4 для дополнительного регулирования расхода теплоносителя.

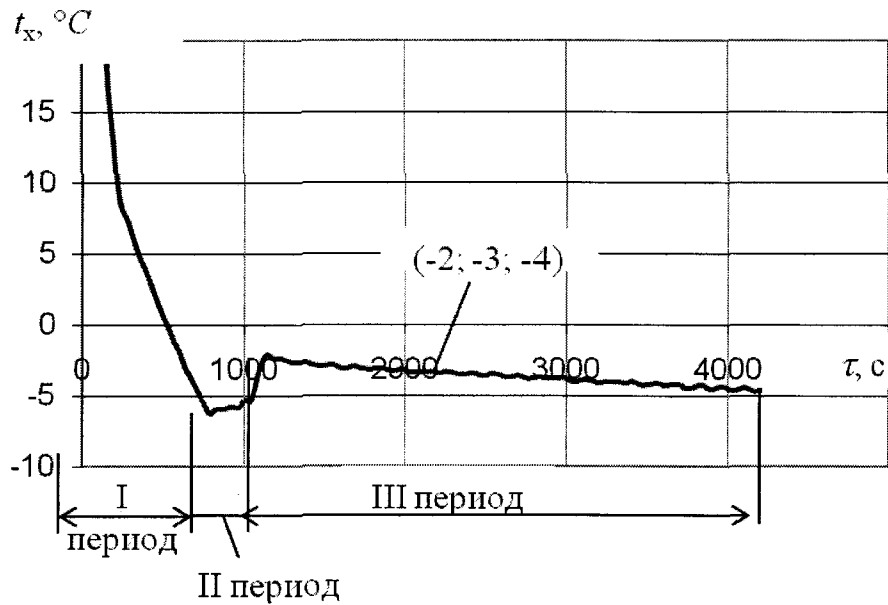
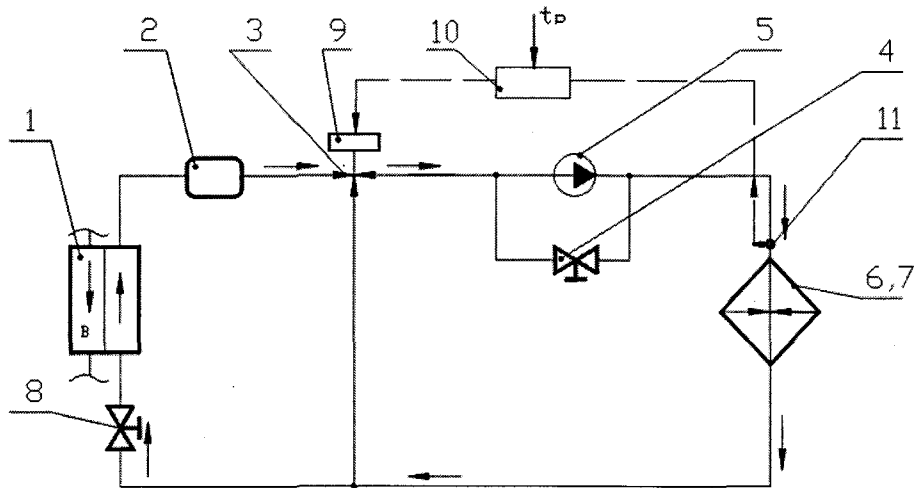


Рис.1 – Характер изменения температуры хладоносителя в процессе опреснения воды вымораживанием



1 – теплообменник, 2 – ресивер, 3 – трехходовой клапан, 4 – ventиль, установленный на байпасной магистрали, 5 – циркуляционный насос, 6 – кристаллизаторы, 7 – емкость, 8 – ventиль ручной, 11 – датчик температуры, установленный на входе в кристаллизаторы 6; 9 – исполнительный механизм, соединенный с трехходовым клапаном 3; 10 – блок управления.

Рис. 2 – Принципиальная схема опреснительной установки

Необходимая температура промежуточного хладоносителя обеспечивается низкотемпературной холодильной машиной, которая работает в позиционном режиме или другого внешнего источника холода. Температурный режим работы кристаллизаторов регулируется с помощью блока управления 10 и путем изменения положения трехходового клапана 3 с помощью исполнительного механизма 9.

Кристаллизация воды из раствора происходит одновременно на внешней поверхности вертикальных трубчатых кристаллизаторов, герметически закрепленных в днище цилиндрической емкости для раствора (рис.3). Конструктивно каждый кристаллизатор выполнен в виде трубки Фильда.

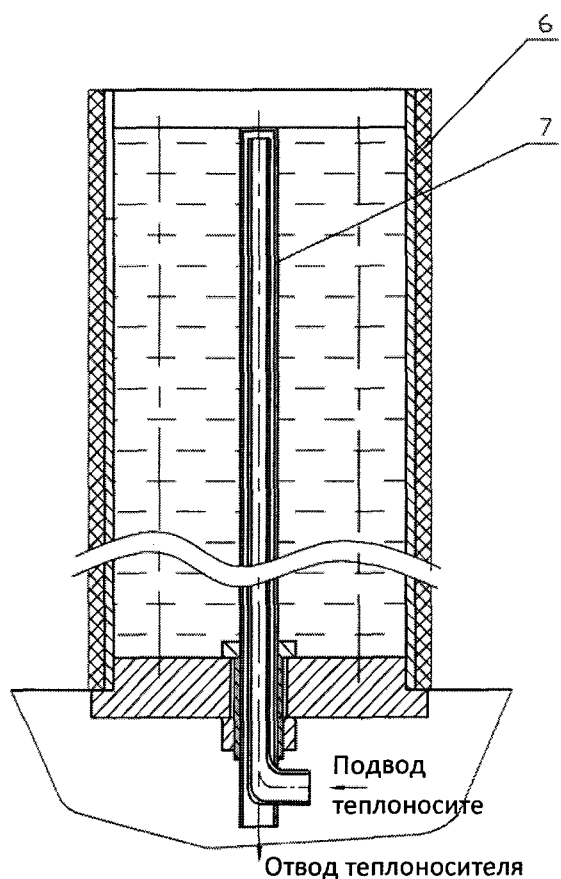


Рис. 3 – Емкость для опресняемого раствора с кристаллизаторами

Отвод теплоты осуществляется промежуточным хладоносителем, который с регулируемой скоростью движется в середине кристаллизатора. Скорость движения промежуточного теплоносителя подобрана такой, чтобы она обеспечивала изотермичность поверхности кристаллизатора по высоте. Подача и отвод промежуточного хладоносителя осуществляется снизу. Слив отработанного раствора из емкости осуществляется через кран в днище емкости.

После окончания процесса вымораживания воды из раствора концентрат сливают в накопительную емкость, а в кристаллизатор подают хладоноситель с температурой, на 1...2°C выше температуры замерзания расплава льда для под плавления прилегающего к поверхности кристаллизатора слоя вымороженной фазы. После этого полученный блочно-трубчатый лед удаляют из установки и осуществляют процесс его плавления для получения опресненной воды. Для повышения степени опреснения воды, если необходимо, перед плавлением вымороженной фазы осуществляется ее выдержка непродолжительное время в емкости с целью стекания с поверхности льда остатков концентрированного раствора.

Для разработки алгоритма изменения температуры хладоносителя в кристаллизаторе в процессе опреснения вымораживания необходимо знать характер понижения температуры замерзания раствора в зависимости от концентрации растворенных в нем веществ, а также закономерности влияния переменного температурного режима работы кристаллизатора

на условия тепло- и массообмена в растворе. Поэтому на первом этапе решения этого вопроса необходимо было разработать математическую модель, которая адекватно описывала все особенности способа и установки, а также отображала характер взаимосвязи различных параметров установки и процесса со свойствами раствора и условиями вымораживания из него воды. Ниже приведена математическая модель процесса теплоотдачи из опресняемого вымораживанием раствора.

Для расчета процесса теплоотдачи при вымораживании используют критериальные уравнения вида: $Nu = A \cdot (Gr \cdot Pr)^n (L/d)^m$ – для естественной конвекции и $Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot K^c$ – для вынужденной конвекции [10–13]. Однако эти уравнения имеют погрешность, поскольку в них не учтено переохлаждение раствора как движущая сила процесса [6], а также взаимное влияние кристаллизаторов и особенности теплоотдачи от раствора к фронту кристаллизации при фазовом переходе.

Для получения модели, которая бы учитывала отмеченные выше факторы, мы также воспользовались теорией подобия и методом анализа размерностей. Зависимой переменной является средний коэффициент теплоотдачи от раствора к фронту кристаллизации. Общий вид функциональной зависимости можно представить в виде:

$$\alpha_p = f(d_{кр}, L_{кр}, \Delta_{кр}, d_{ф}, \rho_p, \mu_p, c_p^p, \lambda_p, g, \Delta\rho, r_{ф}, \Delta T), \quad (1)$$

или, сгруппировав отдельные величины в комплексы для уменьшения количеству переменных, и с учетом, что $\Delta h = c_p^p \cdot \Delta T$, так

$$\alpha_{p^*} = f\left(\frac{L_{кр}}{d_{кр}}, \frac{\Delta_{кр}}{d_{кр}}, \frac{r_{\phi}}{\Delta h}, d_{\phi}, \rho_p, \mu_p, c_p^p, \lambda_p, g, \Delta\rho\right). \quad (2)$$

Список перечисленных параметров представлен в табл.1. Все эти параметры содержат четыре основных размерности: длину (L), массу (M), температуру (T) и время (Θ). Пользуясь анализом размерностей, заменим эту функцию зависимостью между критериями подобия. В данном случае число переменных $n = 10$, число их единиц измерения $m = 4$. Тогда, согласно π -теореме число безразмерных комплексов, которые описывают процесс, будет равняется $(n - m) = 6$.

Представим исходную функцию (2) в виде степени:

$$\alpha_{p^*} = C \cdot \left(\frac{L_{кр}}{d_{кр}}\right)^a \cdot \left(\frac{\Delta_{кр}}{d_{кр}}\right)^b \cdot \left(\frac{r_{\phi}}{\Delta h}\right)^c \cdot d_{\phi}^d \cdot \lambda_p^e \cdot (c_{p_p})^f \cdot \rho_p^g \cdot \mu_p^h \cdot \Delta\rho_p^i \cdot g^j. \quad (3)$$

Получим безразмерные комплексы, $K_1 = L_{кр}/d_{кр}$, $K_2 = \Delta_{кр}/d_{кр}$ и число Стефана $Ste = r_{\phi}/\Delta h$.

Таблица 1 – Список параметров процесса кристаллизации

Параметр	Символ	Размерность
Коэффициент теплоотдачи от раствора к фронту кристаллизации	α_{p^*}	$M \cdot \Theta^{-3} \cdot T^{-1}$
Диаметр кристаллизатора	$d_{кр}$	M
Высота кристаллизатора	$L_{кр}$	M
Шаг размещения кристаллизаторов	$\Delta_{кр}$	M
Диаметр внешней поверхности твердой фазы	d_{ϕ}	M
Плотность раствора	ρ_p	$M \cdot L^{-3}$
Коэффициент динамической вязкости раствора	μ_p	$M \cdot L^{-1} \cdot \Theta^{-1}$
Удельная теплоемкость раствора при постоянном давлении	c_p^p	$L^2 \cdot \Theta^{-2} \cdot T^{-1}$
Коэффициент теплопроводности раствора	λ_p	$M \cdot L \cdot \Theta^{-3} \cdot T$
Ускорение свободного падения	g	$L \cdot \Theta^{-2}$
Изменение плотности раствора при охлаждении	$\Delta\rho$	$M \cdot L^{-3}$
Удельная теплота фазового перехода	r_{ϕ}	$L^2 \cdot \Theta^{-2}$
Изменение энтальпии раствора	Δh	$L^2 \cdot \Theta^{-2}$

Сложим уравнение размерностей без учета показателей степеней a, b та c :

$$\frac{M}{\Theta^3 \cdot T} = L^d \cdot \left(\frac{M \cdot L}{\Theta^3 \cdot T}\right)^e \cdot \left(\frac{L^2}{\Theta^2 \cdot T}\right)^f \cdot \left(\frac{M}{L^3}\right)^g \cdot \left(\frac{M \cdot L}{\Theta}\right)^h \cdot \left(\frac{M}{L^3}\right)^i \cdot \left(\frac{L}{\Theta^2}\right)^j. \quad (4)$$

Для уравнения (4) матрица размерностей имеет вид:

	d	e	f	g	h	i	j
M		1		1	1	1	
L	1	1	2	-3	-1	-3	1
Θ		-3	-3		-1		-2
T		-1	-1				

Сложим систему уравнений для основных единиц:

$$\begin{array}{l} \text{M:} \\ \text{L:} \\ \text{Θ:} \\ \text{T:} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} 1 = e + g + h + i \\ 0 = d + e + 2f - 3g - h - 3i + j \\ -3 = -3e - 2f - h - 2j \\ -1 = -f - h \end{array} \right. \quad (5)$$

В системе (5) из четырех уравнениях есть 7 переменных. Полученную систему уравнений (5) можно решить относительно четырех любых величин, беря три других величины заданными. Решим систему уравнений (5) относительно переменных d, e, f и g , считая заданными величины h, j и i . В результате получим следующую систему уравнений:

$$\begin{array}{l} d = 3j - 1 \\ e = 1 - 2j - h \\ f = h + 2j \\ g = 2j - i \end{array} \quad (6)$$

Используя найденные значения переменных d, e, f и h с учетом показателей степеней a, b и c , перепишем уравнение (3) в следующем виде:

$$\alpha_{p^r} = C \cdot \left(\frac{L_{kp}}{d_{kp}} \right)^a \cdot \left(\frac{\Delta_{kp}}{d_{kp}} \right)^b \cdot \left(\frac{r_{\phi}}{\Delta h} \right)^c \cdot d_{\phi}^{3j-1} \cdot \lambda_p^{1-f} \cdot (c_{pp})^f \cdot \rho_p^{2j-i} \cdot \mu_p^{f-2j} \cdot \Delta \rho_p^i \cdot g^j$$

Сгруппировав отдельные величины, получим:

$$\frac{\alpha_{p^r} \cdot d_{\phi}}{\lambda_p} = \left(\frac{L_{kp}}{d_{kp}} \right)^a \cdot \left(\frac{\Delta_{kp}}{d_{kp}} \right)^b \cdot \left(\frac{r_{\phi}}{\Delta h} \right)^c \cdot \left(\frac{d_{\phi}^3 \cdot \rho_p^2 \cdot g}{\mu_p^2} \right)^d \cdot \left(\frac{\Delta \rho_p}{\rho_p} \right)^i \cdot \left(\frac{\mu_p \cdot c_{pp}}{\lambda_p} \right)^f,$$

учитывая, что $\frac{d_{\phi}^3 \cdot \rho_p^2 \cdot g}{\mu_p^2} = Ar$ и $Ar \cdot \frac{\Delta \rho_p}{\rho_p} = Gr$, получим:

$$Nu = C \cdot Gr^j \cdot Pr^f \cdot Ste^c \cdot K_1^a \cdot K_2^b. \quad (7)$$

Следовательно, с использованием метода анализа размерностей получена критериальная зависимость (7) для расчета теплоотдачи от раствора к фронту кристаллизации с учетом величины переохлаждения раствора и шага размещения кристаллизаторов. Для определения неизвестных показателей степеней и коэффициента C в уравнении (7) необходимо провести обобщение выполненных экспериментальных исследований по изучению влияния конструктивных и режимных параметров на процесс теплоотдачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плотников В.Т. Разделительные вымораживающие установки / В.Т. Плотников, В.П. Филаткин – М.: Агропромиздат, 1987. – 352 с.
2. Холодильні установки: Підручник / І.Г. Чумака, В. П. Чепурненко, С. Ю. Ларьяновский та ін.; за ред. І.Г.Чумака. – 6-е вид. перероб. і доп. –О.: Рефпринтінфо, 2006. –560 с.
3. Техника блочного вымораживания /О.Г. Бурдо, С.И. Милинчук, В.П. Мордынский, Д.А. Харенко. –О.: «Полиграф», 2011. –294 с
4. Фрог, Б.Н. Водоподготовка: учеб. пособие / Б.Н. Фрог, А.П. Левченко. – М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2006. - 656 с.
5. Рябчиков, Б.Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования: монография / Б.Е. Рябчиков – М.: ДеЛиПринт, 2004. – 328 с.
6. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Часть II - СПб: "Мир и Семья", 2006 - 916 с.
7. Пат. UA 105299 С2 Україна, МПК С02F 1/22, (2006.01). Установка для опріснення води [Текст] / Василів О. Б., Коваленко О. О., Тітлов О. С., Іщенко С. В. ; Заявник та патенто власник Одеська національна академія харчових технологій – № а 201300397 ; заяв. 11.01.13; публік. 25.04.2014, Бюл. № 8.
8. Пат. UA 105300 С2 Україна, МПК С02F 1/22, В01D 9/00, F25C 1/00. Спосіб одержання опрісненої води шляхом виморожування [Текст] / Василів О. Б., Коваленко О. О., Тітлов О. С., Іщенко С. В., Фуркало С. В. ; Заявник та патенто власник Одеська національна академія харчових технологій – № у 201300398; заяв. 11.01.13; публік. 25.04.2014, Бюл. № 8.

9. Василів, О.Б. Опріснення води виморожуванням в установці зі змінною в циклі температурою холодноносія / О.Б. Василів, О.С. Тітлов, С.В. Іщенко // «Харчова наука і технологія», –О., №4(17) 2011, –С. 103-107.
10. Шаталина, И.Н. Теплообмен в процессах намораживания и таяния льда. Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 120 с.
11. Holman, J. P. Heat transfer / Jack P. Holman, 10th ed., McGraw-Hill, 2010. –758 p.
12. Джагурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
13. Справочник по теплообменникам: в 2-х т. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.