

УДК 621.565

В.Л. Бондаренко¹, Т.В. Дьяченко¹, Е.Г. Корж¹, О.В. Дьяченко²¹ Одесская национальная академия пищевых технологий, учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского, ул. Дворянская, 1/3, Одесса, 65082, Украина² ООО «Айсблик», ул. Пастера, 29, Одесса, 65026, Украина**ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ, ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УСТАНОВКАХ ОБОГАЩЕНИЯ КРИПТОНОКСЕНОНОВОЙ СМЕСИ**

В работе исследованы кожухотрубные теплообменники, которые используются в установках для обогащения криптоноксеноновой смеси нового поколения. Проведено исследование двух типов теплообменных аппаратов (витых и прямотрубных) по поверхности теплообмена, сопротивлению в межтрубном пространстве и металлоемкости. Изучены конструктивные характеристики поточных конденсаторов при различных типах расположения труб в пучке: шахматном, коридорном и кольцевом. Показаны результаты расчетов удельных параметров: поверхности теплообмена и металлоемкости аппарата. Приведены результаты исследований столбового конденсатора, входящего в состав установки «Хром-3».

Ключевые слова: Криптоноксеноновая смесь – Кожухотрубный теплообменный аппарат – Теплообменник-рекуператор – Конденсатор-испаритель – Поверхность теплообмена – Потери давления – Металлоемкость

В.Л. Бондаренко¹, Т.В. Дьяченко¹, Е.Г. Корж¹, О.В. Дьяченко²¹ Одеська національна академія харчових технологій, навчально-науковий інститут холоду, криотехнологій та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського, вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082, Україна² ТОВ «Айсблік», вул. Пастера, 29, Одеса, 65026, Україна**ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ, ПЕРСПЕКТИВНІ ДО ВИКОРИСТАННЯ В УСТАНОВКАХ ЗБАГАЧЕННЯ КРИПТОНОКСЕНОНОВОЇ СУМІШІ**

В роботі досліджені кожухотрубні теплообмінники, які використовуються в установках збагачення криптоноксенонової суміші нового покоління. Проведено дослідження двох типів теплообмінних апаратів (витих і прямотрубних) по поверхні теплообміну, опору в міжтрубному просторі та металоємності. Вивчені конструктивні характеристики поточних конденсаторів при різноманітних типах розташування труб в пучку: шаховому, коридорному та кільцевому. Показані результати розрахунків питомих параметрів: поверхні теплообміну та металоємності апарату. Приведені результати досліджень стовбового конденсатору, який входить в склад установки «Хром-3».

Ключові слова: Криптоноксенонова суміш – Кожухотрубний теплообмінний апарат – Теплообмінник-рекуператор – Конденсатор-випарник – Поверхня теплообміну – Втрати тиску – Металоємність

DOI: 10.15673/0453-8307.1/2015.34195



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

I. ВВЕДЕНИЕ

Теплообменные аппараты распространены в различных отраслях техники. Они являются неотъемлемой частью технологических процессов, связанных с сепарацией газовых смесей на уровне температур, отличающемся от температуры окружающей среды. Для нагрева либо охлаждения потока используются теплообменники-рекуператоры. Особенно важную роль играют указанные аппараты в криогенной технике [1–7].

Реализация процессов фазовой сепарации, как правило, связана с одновременно протекающими процессами кипения и конденсации, которые реализуются в конденсаторах-испарителях. Эти аппараты применяются не только в процессах разделения воздуха, обогащения смесей, но и в качестве составной части ректификационных колонн (конденсаторы) [1–7].

Ввиду распространенности теплообменных аппаратов в различных технологических процессах, в частности, в системах сепарации газовых

смесей, их совершенствование не теряет актуальности.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕКУПЕРАТОРОВ

Методика расчета. В качестве теплообменников-рекуператоров в технике низких температур, как правило, используется несколько типов аппаратов [2, 7–11]:

- кожухотрубные (прямотрубные и витые);
- пластинчато-ребристые;
- матричные.

Поскольку рабочая температура процесса обогащения криптоноксеноновой смеси, составляет 68...200 К (рисунок 1), исходную смесь необходимо охладить до указанных температур. Теплообменники-рекуператоры являются обязательными элементами системы охлаждения.

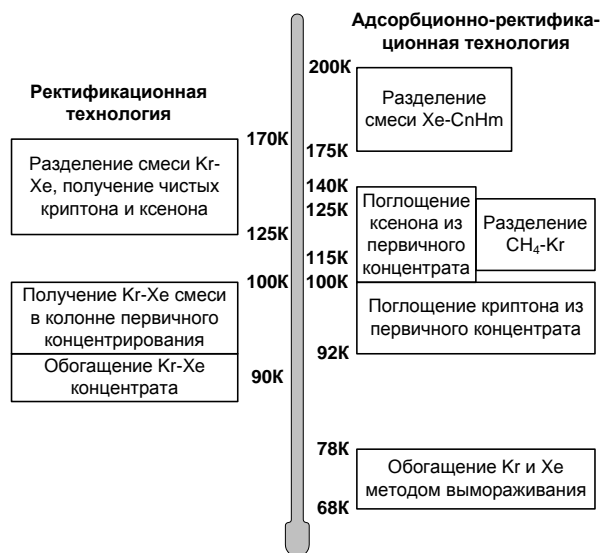


Рисунок 1 – Этапы обогащения и температурные уровни сепарации в технологиях получения криптона и ксенона

В промышленных системах получения инертных газов в качестве рекуперативных теплообменников используют варианты модификаций кожухотрубных теплообменных аппаратов: прямотрубные или витые; гладкотрубные или с трубками, оребренными проволокой; с плотной или разреженной навивкой. При этом, как правило, в трубном пространстве движется прямой поток высокого давления, а в межтрубном – обратный (отбросной технологический поток либо хладагент).

В процессе проектирования и изготовления установок для обогащения и очистки инертных газов собственного типоразмерного ряда фирма ООО «Айсблик» (г. Одесса) в качестве теплообменников-рекуператоров широко применяет как витые, так и прямотрубные аппараты, форма которых подобна буквам латинского алфавита «U», «S» или «W» [12]. Они компактны и легко размещаются в перлитном пространстве холодного блока. Рассмотрим два типа кожухотрубных теплооб-

менных аппаратов, выполненных из гладких или оребренных проволокой трубок:

– витые с разреженной навивкой (рисунок 2, а);

– прямотрубные U-подобные (рисунок 2, б) и сравним их удельные характеристики при работе в установке обогащения криптоноксеноновой смеси типа «Хром».

Особенностью рекуператоров, работающих в указанных системах, является низкое давление исходного потока (0,12...0,17 МПа). Чтобы снизить потери давления, его подают в межтрубное пространство теплообменника.

Расчет витых теплообменников описан в литературе [2, 7, 9–11] и не представляет трудностей. Поскольку U-подобные аппараты не являются широко распространенными, для разработки способа их расчета потребовалось изучить ряд литературных источников [1–3, 7–11]. На основании этого была создана методика, которая реализована в виде компьютерной программы в редакторе Mathcad [12]. В процессе расчета коэффициента теплоотдачи и потерь давления в межтрубном пространстве прямотрубных теплообменных аппаратов как с оребренными, так и неоребранными трубками в качестве определяющего размера был принят эквивалентный диаметр.

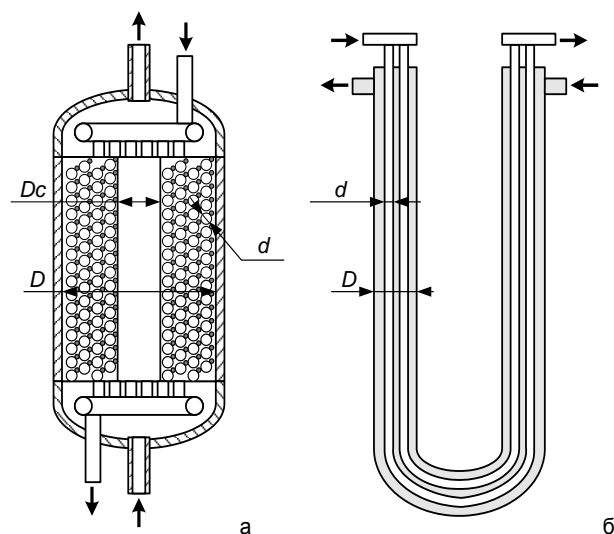


Рисунок 2 – Конструкции рекуператоров, применяемых в опытно-промышленных установках по обогащению и очистке криптона и ксенона содержащих смесей

Исходные данные для исследований. Рассмотрим упрощенную схему холодного блока установки «Хром-3» (рисунок 3) [13–15], которая работает следующим образом: исходная криптоноксеноновая смесь поступает в блок вторичного обогащения с температурой окружающей среды, охлаждается в теплообменнике ТО обратным потоком хладагента и конденсируется в столбовом конденсаторе СК за счет кипения хладагента в межтрубном пространстве.

Перед входом в испаритель парлифта ИП давление жидкости составляет 0,12...0,17 МПа. Для повышения потенциальной энергии потока используется безмашинный нагнетатель. Частичное испарение жидкости в ИП происходит за счет подачи сухого теплого газа в межтрубное пространство и приводит к подъему парожидкостной смеси в фазовый сепаратор ФС, расположенный выше уровня жидкости в СК. Образовавшиеся пары возвращаются на вход столбового конденсатора СК, а жидкость направляется в ИК, где полностью испаряется. Давление газа после испарителя-конденсатора равно сумме давлений исходной смеси и гидростатического столба жидкости за вычетом потерь по длине трубопровода и на местных сопротивлениях.

Далее криптоноксеноновый концентрат поступает в среднюю часть колонны РК, где осуществляется его разделение на криптоноксеноновую смесь (более 99,5 % Kr-Xe) и технический кислород, очищенный от примесей Kr и Xe. Эта фракция возвращается в блоки ВРУ.

Источником холода в конденсаторе колонны РК является жидкий азот. Пары азота после рекуперации выводятся в атмосферу.

Подвод теплоты к кубу колонны РК осуществляется от теплого воздуха. Жидкая криптоноксеновая смесь по мере накопления ее в кубе сливается во внешний испаритель, а, затем, закачивается в баллоны (на схеме не показано).

Рабочая температура в аппаратах холодного блока составляет 90...125 К. Теплообменник-рекуператор используется для охлаждения входящего потока до температуры начала конденсации (около 90 К).

Параметры потоков. Вещество: в межтрубном пространстве находится криптоноксеновая смесь 0,2 % Kr-Xe в кислороде, внутри трубок – воздух.

Давления потоков: $P_1 = 0,15$ МПа (Kr-Xe смесь на основе кислорода), $P_2 = 0,6$ МПа (воздух). Температуры в соответствии с рисунка 3: $T_1 = 300$ К, $T_2 = 110$ К, $T_4 = 280$ К. Расход прямого потока $G_1 = 300$ $\text{м}^3/\text{ч}$, обратного – $G_2 = 250$ $\text{м}^3/\text{ч}$.

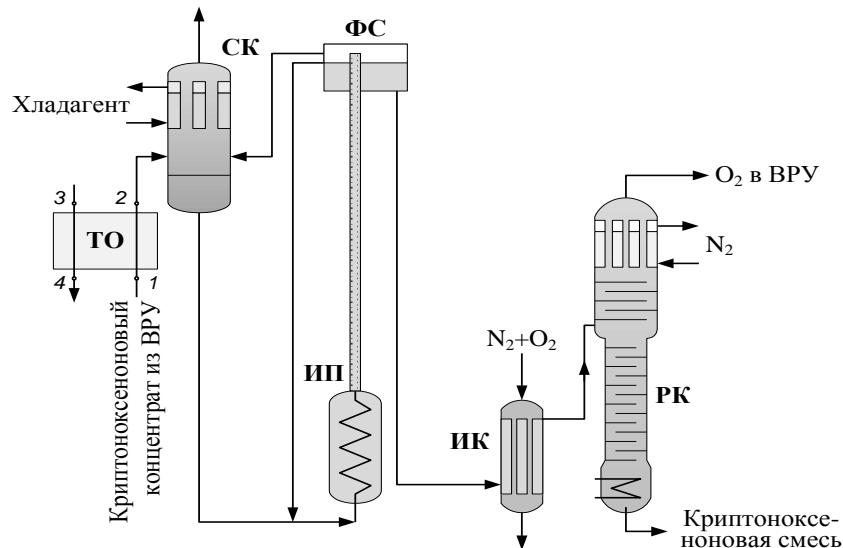


Рисунок 3 – Схема холодного блока установки «Хром-3»:

ТО – теплообменник; СК – столбовой конденсатор; ИП – испаритель парлифта; ФС – фазовый сепаратор; ИК – испаритель-конденсатор; РК – ректификационная колонна; И – испаритель

Таблица 1 – Исходные данные и результаты расчета витых теплообменников-рекуператоров

Параметр	Ед. изм.	Величина				
		130				
Диаметр сердечника D	мм	130				
Диаметр трубки d	мм	10×1	12×1	14×1	16×1,5	20×2
Число труб с оребрением n	шт.	71	46	32	27	19
Число слоев	шт.	12	10	9	8	6
Высота навивки	мм	437	539	597	668	925
Наружный диаметр навивки	мм	376	376	388	392	376
Эквивалентный диаметр d_e	мм	2,4	2,9	3,4	3,9	4,8
Коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве	Вт/(м^2 К)	455	439	426	414	396
Коэффициент теплопередачи k	Вт/(м^2 К)	107	105	103	102	102
Расчетная длина трубы L	м	5,87	7,76	9,77	10,15	12,25

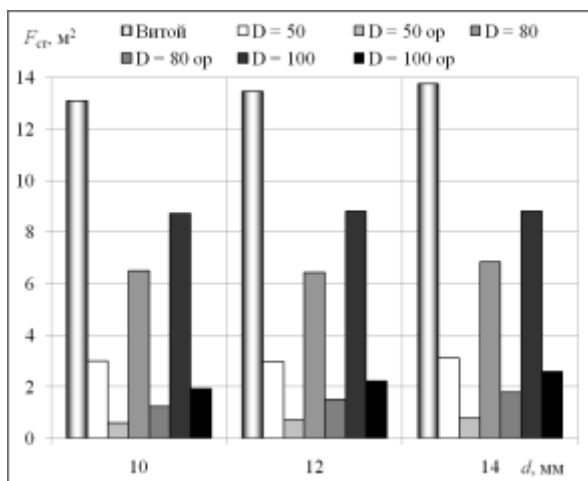
Таблица 2 – Исходные данные и результаты расчета прямотрубных U-подобных теплообменных аппаратов

Параметр	Ед. изм.	Величина								
		50			80			100		
Диаметр кожуха D	мм									
Диаметр трубки d	мм	10×1	12×1	14×1	10×1	12×1	14×1	10×1	12×1	14×1
Без оребрения										
Число труб n	шт.	15	11	8	38	28	21	64	46	35
Эквивалентный диаметр de	мм	5,0	5,0	5,8	5,7	5,7	6,1	4,9	5,2	5,3
Коэффициент теплопередачи на единицу длины k_L	Вт/(м К)	4,70	5,68	6,35	2,17	2,63	3,02	1,62	1,92	2,24
Расчетная длина трубы L	м	6,37	7,18	8,83	5,45	6,10	7,08	4,33	5,08	5,73
Оребренные трубки										
Число труб n	шт.	11	8	6	27	21	17	47	34	27
Эквивалентный диаметр de	мм	7,8	8,4	9,1	9,3	9,2	8,8	8,1	9,0	9,0
Коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве	Вт/(м ² К)	490	496	594	217	234	254	168	169	180
Коэффициент теплопередачи k	Вт/(м ² К)	2321	2001	1811	1132	926	791	729	630	546
Расчетная длина трубы L	м	1,76	2,34	2,95	1,47	1,92	2,39	1,31	1,74	2,17

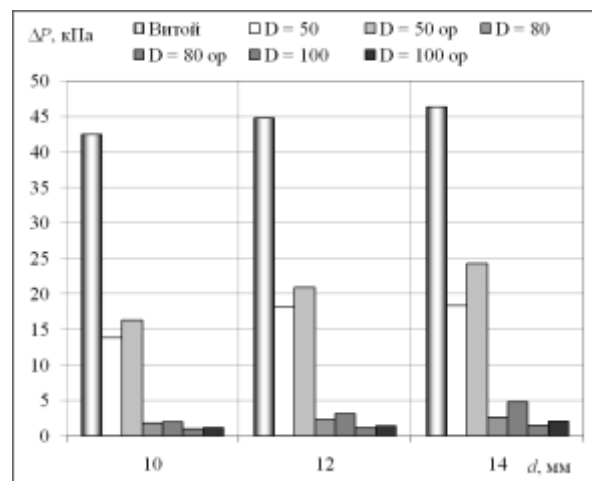
Результаты исследования. В таблицах 1 и 2 представлены результаты расчетов в зависимости от геометрических параметров труб. Для оребрения использована медная проволока диаметром 1,5 мм с шагом 5 мм.

Теплоприток к рекуператору был принят $Q_{ТО} \approx 2$ кВт (5 % от тепловой нагрузки аппарата). Термодинамические свойства кислорода и воздуха определялись с использованием программы расчета свойств веществ Refprop-8, разработанной фирмой NIST [16].

Оптимизация теплообменных аппаратов производилась по трем критериям: поверхности теплообмена, сопротивлению в межтрубном пространстве и металлоемкости аппарата. Результаты расчетов представлены на рисунках 4, 5. Расчетные исследования показали, что при одних и тех же условиях для U-подобного теплообменника требуется значительно меньшая поверхность теплообмена (рисунок 4, а), чем для витого аппарата с разреженной навивкой. При этом потери давления в межтрубном пространстве существенно уменьшаются (рисунок 4, б).



а



б

Рисунок 4 – Влияние конструкции аппарата на поверхность теплообмена (а) и потери давления в межтрубном пространстве для двух типов теплообменных аппаратов в зависимости от диаметра трубки и наличия оребрения

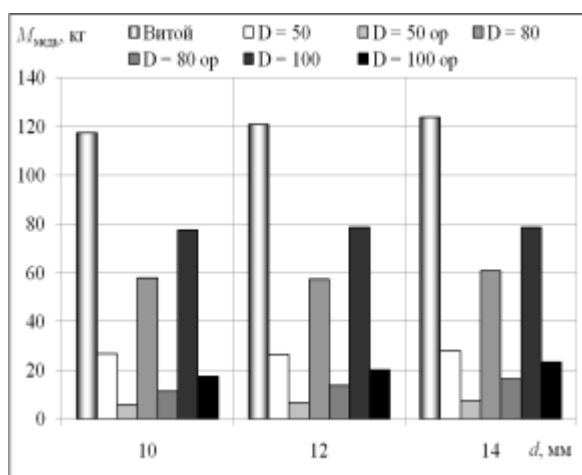
Оребрение проволокой, как и ожидалось, приводит к интенсификации теплообмена в межтрубном пространстве, что связано с увеличением поверхности теплообмена со стороны потока с меньшим коэффициентом теплоотдачи. За счет оребрения несколько увеличивается площадь свободного сечения. Оребрение также приводит к дополнительной турбулизации потока и некоторому увеличению потерь давления.

Величина эквивалентного диаметра прямо-трубного теплообменника во многом зависит от соотношения диаметров кожуха, трубок и размеров ребра, а также числа труб, которые можно разместить в аппарате. В целом сопротивление при движении потока в межтрубном пространстве для U-подобного теплообменника с оребренными

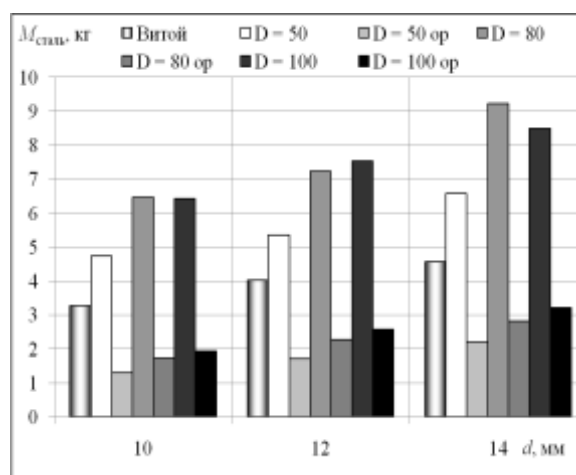
трубками значительно ниже, чем для витого аппарата (рисунок 4, б). Причем, для большего кожуха ($\varnothing 80$ и 100 мм) этот параметр меньше, чем для $\varnothing 50$ мм.

Несмотря на компактность, для изготовления витого теплообменника потребуется значительно больше меди (рисунок 5, а). Следовательно, прямотрубный теплообменный аппарат при тех же параметрах потоков будет значительно дешевле. Масса стальных деталей для двух типов рекуператоров практически соизмерима (рисунок 5, б).

Учет всех параметров приводит к заключению, что лучшим для заданных условий теплообмена будет U-подобный аппарат с диаметром кожуха 80 мм и размещенной внутри трубкой $\varnothing 12$ мм, оребренной медной проволокой $\varnothing 1,5$ мм.



а



б

Рисунок 5 – Масса меди (а) и стали (б) для изготовления деталей теплообменного аппарата в зависимости от его конструкции

III. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРЯМОТРУБНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ-ИСПАРИТЕЛЕЙ

Конденсаторы-испарители по конструктивному исполнению [2, 7–11] подразделяются на:

– кожухотрубные (широко применяются в химических технологиях, в установках разделения воздуха, в узлах обогащения инертных газов и т. п.). Их разновидностью являются аппараты типа труба в трубе (как правило, аппараты малых нагрузок);

– пластинчатые (используются в холодильной технике, в частности, в водоаммиачном абсорбционном цикле);

– пластинчато-ребристые (эффективные конденсаторы-испарители в блоках разделения воздуха).

В установках сепарации и очистки тяжелых инертных газов наиболее широкое применение нашли прямотрубные кожухотрубные аппараты, отличающиеся простотой изготовления и малым сопротивлением межтрубного пространства. Эффективность работы конденсаторов-испарителей

оценивалась по их удельным характеристикам:

– удельная поверхность теплообмена

$$f = \frac{F}{V} = \frac{4 \pi n D_H L}{\pi D_{OB}^2 L} = \frac{4 n D_H}{D_{OB}^2}, \text{ м}^{-1} \quad (1)$$

где F – теплообменная поверхность, м^2 ; V – объем трубного пространства, м^3 ; D_H – наружный диаметр трубки; D_{OB} – диаметр обечайки, м.

– удельная металлоемкость трубного пучка

$$m = \frac{M}{V} = \frac{F \delta \rho}{V} = f \delta \rho, \text{ кг/м}^3 \quad (2)$$

где M – масса аппарата, кг; δ – толщина стенки трубы, м; ρ – плотность материала, из которого изготовлены трубки, кг/м^3 .

В технологическом оборудовании используют три основных способа размещения труб в пучке: коридорное, шахматное и радиальное (рисунок 6, а-в) [17, 18].

На первый взгляд, множество определяющих размеров допускает многовариантность конструктивных исполнений. В действительности, выбор конкретной структуры пучка задается располагаемым сортаментом труб [19] и, во многом, ограни-

чен технологией соединения элементов трубной решетки. Минимальное расстояние между трубками находится в интервале 6...10 мм.

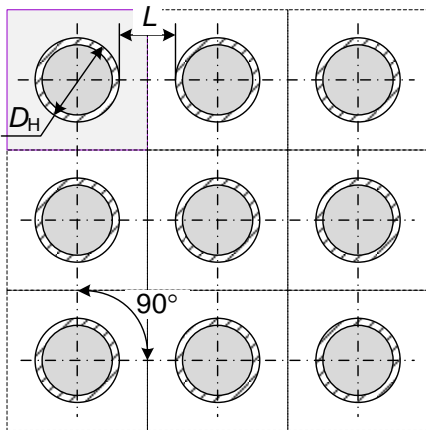
На рисунке 6 приведены формулы для расчета удельной поверхности теплообмена, соответствующие типам трубных пучков для единицы длины (1 м) с учетом показанных на рисунке геометрических построений. Допущения:

- выделенный контур ограничивает участок живого сечения, приходящийся на одну трубку;
- «краевые» эффекты (влияние участка, близкого к наружной обечайке и центральной трубке при радиальном расположении труб) не учитываются;
- площадь криволинейной трапеции для ра-

диального пучка рассчитываем как произведение ее высоты на длину части окружности, на которой располагаются трубки ряда, приходящейся на одну трубку.

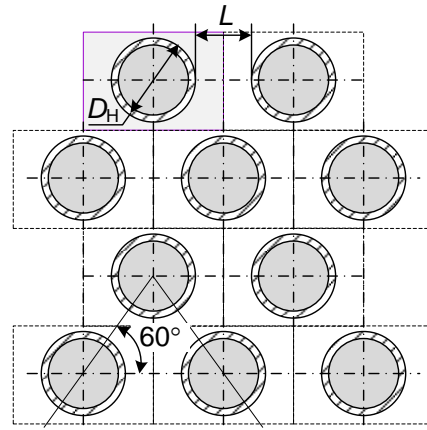
Анализ формул (3)-(6) показывает, что удельная поверхность теплообмена не зависит от числа труб в пучке, причем, для шахматного пучка удельные характеристики выше, чем для коридорного и радиального (рисунок 7).

Дополнительного увеличения указанного параметра можно добиться путем использования кольцевого канала (рисунок 6, г). При этом удельная поверхность теплообмена увеличивается на величину, пропорциональную длине окружности рассчитываемой поверхности.



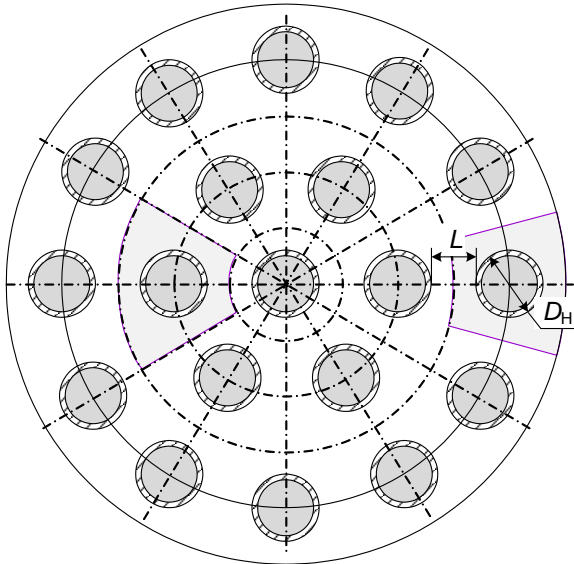
$$f_1 = \frac{\pi D_H}{(D_H + L)^2} = \frac{3,14 D_H}{(D_H + L)^2} \quad (3)$$

а



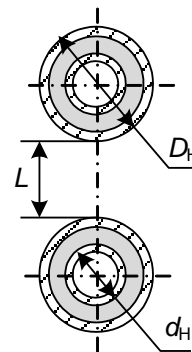
$$f_2 = \frac{2 \pi D_H}{\sqrt{3} (D_H + L)^2} = \frac{3,63 D_H}{(D_H + L)^2} \quad (4)$$

б



$$f_3 = \frac{3 D_H}{(D_H + L)^2} \quad (5)$$

в



$$f_2^{\text{III}} = \frac{3,63 D_H}{(D_H + L)^2} + \frac{3,63 (d_H - 2 \delta_{\text{BH}})}{(D_H + L)^2} \quad (6)$$

г

Рисунок 6 – Варианты компоновок прямотрубных теплообменных аппаратов:

а – коридорное; б – шахматное; в – радиальное; г – две трубки с движением прямого потока в кольцевом канале; D_H , d_H – наружные диаметры внешней и внутренней трубок, соответственно, м; δ_{BH} – толщина стенки внутренней трубки, м; L – расстояние между трубками «под сварку», м

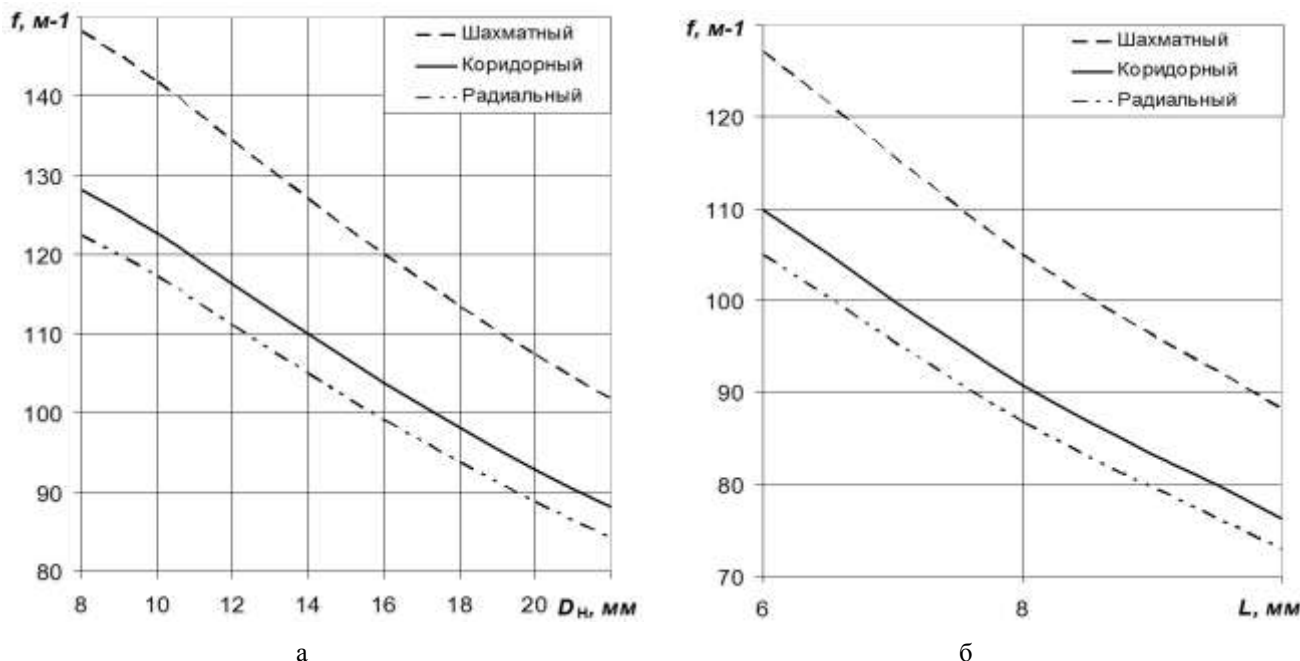


Рисунок 7 – Зависимость удельной поверхности теплообмена от диаметра наружной трубки для $L = 6$ мм (а) и расстояния между трубками для $D_n = 14$ мм (б)

IV. ВАРИАНТЫ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ СТОЛБОВОГО КОНДЕНСАТОРА

Исходные данные и методика расчета СК.

Методика расчета прямотрубного конденсатора-испарителя с межтрубным кипением изложена в литературе [11, 20–22]. В качестве исходных данных задаются длина трубы, ее диаметр и давление

конденсирующего потока. В межтрубном пространстве кипит жидкий азот, в трубах конденсируется криптоноксеноновая смесь на основе кислорода.

Исходные данные для исследования приведены в таблице 3. Размеры трубок, для которых производились расчеты, показаны в таблицах 4-6, расстояние между трубками $L = 8$ мм.

Таблица 3 – Исходные данные для расчета столбового конденсатора СК

Параметр	Ед. изм.	Величина
Давление кислорода (Кг-Хе концентрата) в трубном пространстве	МПа	0,15
Температура криптоноксенонового концентрата на основе кислорода в трубках	К	94,1
Расход смеси в трубном пространстве	нм ³ /ч	300
Давление хладагента (азота) в межтрубном пространстве	МПа	0,33
Температура хладагента (азота)	К	89,1
Расход азота	кг/ч	53,8
Длина трубок в трубном пучке $L_{тр}$	мм	600

Результаты оптимизации. В соответствии с изложенной выше методикой было выполнено расчетное исследование прямотрубных конденсаторов-испарителей (таблицы 4-6). В результате оптимизационных расчетов для пучка одиночных труб и кольце-

вых каналов без учета краевых эффектов были получены графики зависимости удельной поверхности теплообмена и удельной металлоемкости аппарата для шахматного пучка. Он был определен в качестве лучшего по результатам предварительных исследований.

Таблица 4 – Результаты оптимизации СК по диаметру трубы

Параметр	Ед. изм.	Величина						
		6×1	8×1	10×1	12×1	14×1	16×1,5	20×2
Диаметр трубки D_n (рис. 7, б)	мм	6×1	8×1	10×1	12×1	14×1	16×1,5	20×2
Число труб	шт.	319	269	212	140	94	63	42
Коэффициент теплопередачи k	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	151,2	134,4	136,2	172,6	220,7	286,7	349,0
Расчетная поверхность теплообмена F	м ²	3,60	4,05	3,99	3,15	2,46	1,90	1,56
Удельная поверхность теплообмена f	м ⁻¹	111,1	113,4	112,0	108,9	105	100,8	92,6
Удельная металлоемкость m	кг/м ³	4343	3420	2814	2389	2074	2657	2814

Анализ результатов (таблица 4, рисунок 8, а) показал, что удельная поверхность теплообмена, в целом, уменьшается с ростом диаметра трубок. Для одиночных труб $\varnothing 8 \times 1$ мм наблюдается оптимум. При этом удельная поверхность максимальна и равна $113,4 \text{ м}^{-1}$.

Для удельной массы пучка также был обнаружен оптимум (минимум, таблица 4, рисунок 8, б) для трубы 14×1 мм. Удельная масса при этом составляет $2,1 \text{ т/м}^3$.

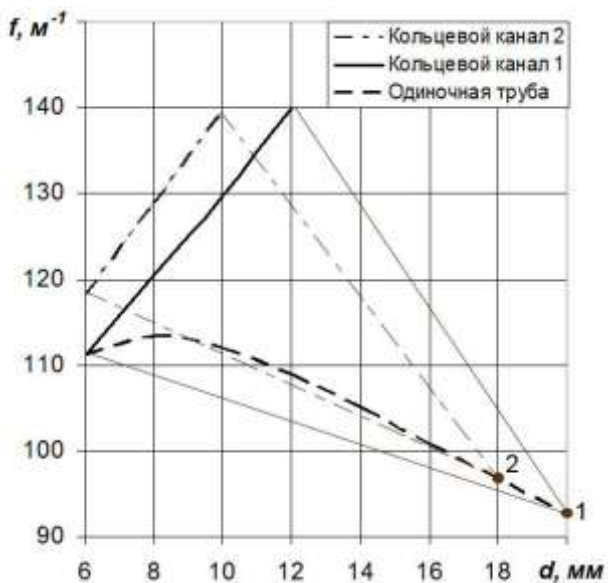
Исследования кольцевого канала (таблицы 5, 6, рисунок 8) показали, что с увеличением диаметра внутренней трубки (уменьшения размера кольцевого зазора) растет удельная поверхность теплообмена. Следовательно, при фиксированной длине число труб в аппарате значительно уменьшается. Соответственно, удельная масса пучка растет. Тем не менее, аппарат при этом становится более компактным (см. таблицы 5 и 6). Эта тенденция сохраняется для всех диаметров труб.

Таблица 5 – Результаты оптимизации СК по диаметру внутренней трубки при заданном размере наружной для кольцевого канала 1 ($D_H = 20 \times 2$ мм)

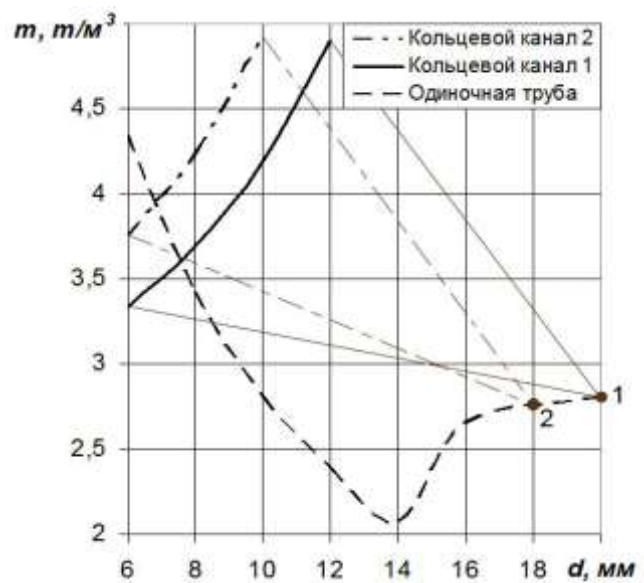
Параметр	Ед. изм.	Величина			
Диаметр внутренней трубки d_H (рис.7, г)	мм	6×1	8×1	10×1	12×1
Число трубок	шт.	28	24	21	17
Эквивалентный диаметр кольцевого канала, dk	мм	10	8	6	4
Коэффициент теплопередачи k	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	407,4	437,0	476,8	535,5
Расчетная поверхность теплообмена F	м^2	1,34	1,25	1,14	1,02
Удельная поверхность теплообмена f	м^{-1}	111,1	120,4	129,6	138,9
Удельная металлоемкость m	кг/м^3	3339	3694	4188	4899

Таблица 6 – Результаты оптимизации СК по диаметру внутренней трубки для кольцевого канала 2 ($D_H = 18 \times 2$ мм)

Параметр	Ед. изм.	Величина		
Диаметр внутренней трубки d_H (рис.7, г)	мм	6×1	8×1	10×1
Число трубок	шт.	30	25	21
Эквивалентный диаметр кольцевого канала, dk	мм	8	6	4
Коэффициент теплопередачи k	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	410,3	448,9	506,1
Расчетная поверхность теплообмена F	м^2	1,33	1,21	1,08
Удельная поверхность теплообмена f	м^{-1}	118,1	128,9	139,6
Удельная металлоемкость m	кг/м^3	3756	4234	4931



а



б

Рисунок 8 – Результаты расчетов столбового конденсатора (расстояние между трубками равно 8 мм; кольцевой канал 1: наружная трубка – 20×2 мм; кольцевой канал 2 – 18×2 мм). Точками «1» и «2» отмечены значения удельной поверхности и металлоемкости для диаметров 20×2 и 18×2 мм, соответственно

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования работы кожухотрубных теплообменников-рекуператоров, пригодных для использования в установках обогащения криптоноксеноновой смеси, производилась по трем критериям: поверхности теплообмена, сопротивлению в межтрубном пространстве и металлоемкости аппарата. Результаты расчетов показали, что прямотрубные U-подобные теплообменные аппараты для заданных условий являются более эффективными, чем витые. Поверхность теплообмена и сопротивление газа в межтрубном пространстве для этих аппаратов значительно ниже. В процессе изготовления прямотрубных теплообменников требуется значительно меньше материала, чем для витых. Из исследованных аппаратов оптимальным принят U-подобный теплообменник из 27-ми оребренных трубок диаметром 12 мм с диаметром кожуха 80 мм.

В результате оптимизации конструктивных характеристик прямотрубных конденсаторов-испарителей с круговыми и кольцевыми каналами по удельной поверхности теплообмена и удельной массе пучка с учетом заданных условий теплообмена получено, что:

- в пучке из одиночных труб удельная поверхность теплообмена не зависит от числа труб. При этом шахматное расположение более эффективно, чем коридорное и радиальное;

- указанный параметр уменьшается с ростом диаметра канала и расстояния между трубками. Для одиночных труб $\varnothing 8 \times 1$ мм наблюдается оптимум. При этом удельная поверхность максимальна и равна $113,4 \text{ м}^{-1}$;

- для заданной геометрии удельная масса трубного пучка имеет минимум при значении диаметра трубы 14×1 , равный $2,1 \text{ т/м}^3$;

- применение кольцевого канала в 1,2...1,5 раза (в зависимости от диаметра внутренней трубки) увеличивает удельную поверхность теплообмена. При фиксированной длине число труб в аппарате значительно уменьшается;

- с увеличением диаметра внутренней трубки (уменьшения размера кольцевого канала) растут удельная поверхность теплообмена и удельная масса пучка. Аппарат становится более компактным.

Результаты исследований кожухотрубных теплообменников-рекуператоров и прямотрубных конденсаторов-испарителей могут быть использованы в процессах проектирования и модернизации различных систем сепарации газовых смесей, входящих в состав технологий получения инертных газов высокой чистоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин В.И.** Криогенные системы. – М.: Машиностроение, 1999. – Т. 1. – 576 с.
2. **Архаров А.М., Архаров И.А., Беляков В.П.** и др. Криогенные системы. – М.: Машиностроение, 1999. – Т. 2. – 720 с.
3. **Плановский А.Н., Николаев П.И.** Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Химия, 1987. – 496 с.
4. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. **М.П. Малкова**. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 431 с.
5. **Головко Г.А.** Установки для производства инертных газов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1974. – 383 с.
6. **Бондаренко В.Л., Симоненко Ю.М.** Криогенные технологии извлечения редких газов. – Одесса: Астропринт, 2013. – 332 с.
7. **Григорьев В.А., Крохин Ю.И.** Теплообменные аппараты криогенной техники. – М.: Энергия, 1982. – 311 с.
8. Промышленные теплообменные процессы и установки / Под ред. **А.М. Бакластова**. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 228 с.
9. Теплопередача при низких температурах / Под редакцией **У. Фроста**. – М.: Мир, 1977. – 391 с.
10. **Авчухов В.В., Паюсте Б.Я.** Задачник по процессам теплообмена: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
11. Примеры расчетов установок глубокого охлаждения / Под ред. **С.С. Будневича**. – Л.: Машиностроение, 1979. – 367 с.
12. **Бондаренко В.Л., Дьяченко Т.В.** К выбору типа теплообменного аппарата, используемого в установках обогащения и очистки неонгелиевой смеси // Харчова наука і технологія. – Одеса: ОНАХТ. – 2013. – № 4 (25). – С. 119-123.
13. **Бондаренко В.Л., Лосяков Н.П., Савинов М.Ю. и др.** Высокоэффективная установка «Хром-3» для получения криптоноксеноновой смеси // Технические газы. – 2005. – № 2. – С. 31-35.
14. **Савинов М.Ю., Архаров А.М., Позняк В.Е. и др.** Разработка и создание эффективной установки «Хром-3» для получения криптоно-ксеноновой смеси // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – № 5. – С. 20-26.
15. Каталог АО «Хром»: каталог: разработанный АО «ХРОМ». – М. – 2008. – 30 с.
16. Fluid Thermodynamic and Transport Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures (REFPROP. Version 8.0): [U.S. Department of Commerce] // National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland. – NIST. – 2007.
17. **Игнатов Ю.Я.** Примеры расчетов криогенных адсорбционных систем: учебное пособие. – Л.: ЛТИХП. – 1985. – 81 с.
18. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. – Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1969. – 440 с., с ил.
19. ГОСТ 8734-75. Трубы стальные бесшовные холодноформированные. – М.: ИПК, изд. Стандартов. – 1996. – 18 с.
20. **Епифанова В.И., Аксельрод Л.С.** Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. – М.: Машиностроение, 1973. – Т. 1. – 468 с.
21. **Погорелов А.И.** Теплообмен (основы и теория расчета): учебное пособие для вузов. – Одесса: Черноморье, 1999. – 128 с.
22. **Кутателадзе С.С., Консетов В.В.** Теплообмен при конденсации пара внутри вертикальных труб // Изв. ВУЗов. Энергетика. – 1961. – № 11. – С. 63-69.

V.L. Bondarenko¹, T.V. Diachenko¹, E.G. Korzh¹, O.V. Diachenko²

¹ Odessa National Academy of Food Technologies, Educational and Research Institute of Refrigeration, Cryotechnology and Ecoenergetics n.a. V.S. Martynovskiy, 1/3, Dvoryanskaya Str., Odessa, 65082, Ukraine

² Iceblick Ltd., 29, Pastera Str., Odessa, 65026

HEAT EXCHANGERS PERSPECTIVE FOR USE IN THE UNITS FOR KRYPTON-XENON MIXTURE ENRICHMENT

The shell-and-tube heat exchangers that are used in the new generation plants for the enrichment of the Kr/Xe mixture have been researched. The two types of heat exchangers (twisted and straight-through tube) have been researched in regard to the surface of the heat transfer, resistance in the annular space and metal intensity. The design characteristics of the capacitors at the various types of the tube beam: checkerboard, corridor and ring-type have been researched. The calculations results of the specific characteristics: heat exchange surface and metal intensity of the device have been shown. The results of the researches for a pole-type capacitor included in the design of the Chromium-3 plant have been given.

Keywords: Krypton-xenon mixture – Shell and tube heat exchanger – Heat exchanger-recuperator – Condenser-evaporator – Heat exchange surface – Pressure losses – Metal intensity.

REFERENCES

1. Arkharov A.M., Marfenina I.V., Mikulin V.I. 1999. Cryogenic Systems. – Moscow: Mashinostroenie. – Vol. 1. – 576 p. (in Russian).
2. Arkharov A.M., Arkharov I.A., Belyakov V.P. et al. 1999. Cryogenic Systems. – Moscow: Mashinostroenie. – Vol. 2. – 720 p. (in Russian).
3. Planovskyy A.N., Nikolaev P.I. 1987. Processes and devices of Chemical and Petrochemical Technology. – Moscow: Khimiya. – 496 p. (in Russian).
4. Handbook of Physical and Technical Fundamentals of Cryogenics. 1985. Ed. M.P. Malkov. – Moscow: Energoatomizdat. – 431 p. (in Russian).
5. Golovko G.A. 1974. Installations for Inert Gases production. – Mashinostroenie, Leningrad Dep. – 383 p. (in Russian).
6. Bondarenko V.L., Simonenko Yu.M. 2014. Cryogenic Technologies of Rare Gases Extraction. – Odessa: Astroprint. – 312 p.
7. Grigoriev V.A., Krohin I.O. 1982. Heat and Mass Devices of Cryogenic Equipment. – Moscow: Energia. – 311 p. (in Russian).
8. Industrial Heat and Mass Processes and Installations. 1986. Ed. A.M. Baklastova. – Moscow: Energoatomizdat. – 228 p. (in Russian).
9. Heat Transfer at Low Temperatures. 1977. Ed. U. Frost. – Moscow: Mir. – 391 p. (in Russian).
10. Avchuhov V.V., Pauste B.Ya. 1986. Exercise Book on Processes of Heat and Mass Exchange: Manual for Higher Education Institutions. – Moscow: Energoatomizdat. – 144 p. (in Russian).
11. Examples of Calculations of Deep Cooling Installations. 1979. Ed. S.S. Budnevich. – Leningrad: Mashinostroenie. – 367 p. (in Russian).
12. Bondarenko V.L., Diachenko T.V. 2013. To the Choice the Type of Heat Exchanger Used in the Installations of Neon-Helium Mixture Enrichment and Purification. *Kharchova Nauka i Tekhnologiya. [Food Science and Technology]*. – Odessa: ONAFT. – No. 4 (25). – P. 119-123. (in Russian).
13. Bondarenko V.L., Losyakov N.P., Savinov M.Yu. et al. 2005. High Efficiency Unit “Chromium-3” for Krypton-Xenon Mixture Receiving. *Tekhnicheskie gasi. [Industrial gases]*. – No. 2. – P. 31-35. (in Russian).
14. Savinov M.Yu., Arkharov A.M., Poznyak V.E. et al. 2007. Development and Creation of the Effective Installation “Chromium-3” for Krypton-Xenon Mixture Receiving. *Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie. [Chemical and Petroleum Engineering]*. – No. 5. – P. 20-26. (in Russian). doi: 10.1007/s10556-007-0047-3
15. Catalog JSC «Chromium-3»: Developed by JSC «Chromium-3». 2008.–Moscow.– 30 p. (in Russian).
16. Fluid Thermodynamic and Transport Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures (REFPROP. Version 8.0): [U.S. Department of Commerce]. 2007. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland. – NIST.
17. Ignatov Yu.Ya. 1985. Examples of Calculations of Cryogenic Adsorptive Systems: Manual. – Leningrad.: LTIHP. – 81 p. (in Russian).
18. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. 1969. Heat Transfer. – Edition 2. – Moscow: Energiya. – 440 p., with pictures (in Russian).
19. GOST 8734-75. 1996. Steel Seamless Cold Formed Pipes. – Moscow: IPK, Standards Publishing House. – 18 p. (in Russian).
20. Epifanova V.I., Akselrod L.S. 1973. Air Division by Method of Deep Cooling. – Moscow: Mashinostroenie, – Vol. 1. – 468 p. (in Russian).
21. Pogorelov I. 1999. Heat and Mass Transfer (Bases and Theory of Calculation): Manual for Higher Education Institutions. – Odessa: Chernomorie. – 128 p. (in Russian).
22. Kutateladze S.S., Konsetov V.V. 1961. Heat Exchange at Vapor Condensation in Vertical Pipes. *News of Higher Education Institutions. Power Industry*. – No. 11. – P. 63-69. (in Russian).

Отримана в редакції 03.11.2014, прийнята до друку 17.11.2014