

УДК 621.5

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА СМЕСЕВЫХ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТАХ

**А. В. ОВСЯННИК, Е. Н. МАКЕЕВА**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Рассмотрены теплообменные аппараты испарительного типа холодильных и теплонасосных установок и основные направления интенсификации теплообмена в них. Предложена конструкция теплообменного аппарата испарительного типа с поперечным наружным оребрением. Получена математическая модель рассматриваемого теплообменного аппарата в упрощенном виде, которая может быть использована в технических расчетах. Результаты расчета по полученной методике соотнесены с данными проведенных экспериментов. Отклонения эмпирических и теоретических данных – в допустимых пределах. Разработана методика расчета для определения интенсивности теплоотдачи при парообразовании смесевых озонобезопасных хладагентов на оребренных поверхностях, учитывающая геометрические параметры поверхности и зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований теплообмена при кипении.*

**Ключевые слова:** испаритель, проектирование теплообменного оборудования, оребренная поверхность, озонобезопасный хладагент, интенсивность теплообмена.

## DESIGN OF HIGH EFFICIENCY EVAPORATION EQUIPMENT FUNCTIONING ON OZONE SAFE REFRIGERANTS MIXTURE

**A. V. OVSIANNIK, E. N. MAKEEVA**

*Educational Institution “Sukhoi State Technical University  
of Gomel”, the Republic of Belarus*

*Heat exchangers of the evaporative type of refrigeration and heat pump installations and the main directions of intensification of heat transfer in them have been considered. The design of an evaporative-type heat exchanger with transverse external ribbing is proposed. A simplified mathematical model of the considered heat exchanger has been obtained, which can be used in technical calculations. The calculation results according to the obtained technique are correlated with the data of the experiments. Deviations of empirical and theoretical data are within acceptable limits. A calculation method has been developed to determine the intensity of heat transfer during vaporization of mixed ozone-safe refrigerants on ribbed surfaces, taking into account the geometric parameters of the surface and dependences obtained as a result of experimental studies of heat transfer during boiling.*

**Keywords:** evaporator, design of heat exchange equipment, ribbed surface, ozone-safe refrigerant, heat exchange rate.

### **Введение**

В настоящее время одним из основных направлений в проектировании оборудования является усовершенствование традиционных типов аппаратов. С ростом энергетических мощностей и объема производства все более увеличиваются масса и габариты применяемых теплообменных аппаратов, на изготовление которых расходуется немало средств и материалов. При разработке теплообменного оборудова-

ния существует проблема снижения размеров и массы теплообменников и повышения эффективности их работы. Усложняется и конструкция теплообменников. При создании и производстве теплообменных аппаратов одна из основных задач – повышение эффективности теплообмена. Для интенсификации процесса в теплообменных аппаратах используются все более сложные схемы. Например, применяются турбулизаторы, закрутка потока в трубах с помощью винтовых вставок, каналы сложной формы, лопаточные завихрители, расположенные на входе или вдоль всей трубы. С целью повышения эффективности теплообмена к потоку газа подмешиваются капли жидкости или твердые частицы, а к потоку жидкости – газовые пузырьки. Для интенсификации процессов воздействуют на жидкость электростатическими или ультразвуковыми полями, используют действие вибрации и акустического резонанса. Одним из эффективных методов интенсификации теплообмена является создание благоприятных поверхностных условий для возникновения и роста паровых пузырей – развитие теплоотдающей поверхности: применение оребрения с определенными геометрическими параметрами и нанесение на поверхность различного рода покрытий [9].

Цель работы – провести экспериментальное изучение теплообменного аппарата с оребренной поверхностью, разработать методику расчета для определения интенсивности теплоотдачи при парообразовании смесевых озонобезопасных хладагентов на развитых поверхностях.

#### **Традиционные типы теплообменных аппаратов испарительного типа холодильных и теплонасосных установок**

Одними из основных элементов холодильных и теплонасосных установок являются рекуперативные теплообменные аппараты, которые по конструктивному исполнению делятся на кожухотрубчатые, пластинчатые, спиральные, змеевиковые, типа «труба в трубе» и др. Широкое применение рекуперативных теплообменников обуславливает дальнейшее совершенствование их конструкций с целью интенсификации процесса теплообмена, снижения массогабаритных показателей и стоимости.

Традиционные кожухотрубные теплообменники, в том числе с плавающими головками и *U*-образными трубками, громоздки, имеют большие потери давления потоков теплообменных сред. Возможности их использования при низких и высоких температурах, а также при повышенных давлениях и больших перепадах температур и давлений теплообменных сред ограничены.

Эффективен и надежен в работе кожухотрубный теплообменник с дистанционирующими пластинами, которые не оказывают заметного гидравлического сопротивления и обеспечивают дистанционирование трубок в соседних рядах, тем самым повышая эффективность теплообмена между теплоносителем и хладагентом [1].

Высокий коэффициент теплопередачи, малое гидравлическое сопротивление, небольшие габаритные размеры и массу имеет кожухотрубный теплообменник с *U*-образными трубками [1].

Значительная доля в выпускаемом оборудовании приходится на кожухотрубные испарители затопленного типа. Эти аппараты обладают рядом преимуществ: относительно высокая теплопередающая эффективность, надежность, а также отработанная годами простота в технологии изготовления, что значительно снижает стоимость аппарата. Интенсифицировать теплообмен в рассматриваемом типе аппаратов можно как со стороны теплоносителя, так и со стороны рабочего вещества. Практический интерес представляет поиск возможных методов увеличения теплоотдачи со стороны кипящего хладагента в межтрубном пространстве испарителя [5].

Теплопередача в пластинчатых испарителях осуществляется между потоком однофазного хладоносителя и кипящим хладагентом. Потоки движутся в смежных

щелевых каналах сложной формы. Теплоотдача со стороны хладоносителя в канале с малым эквивалентным диаметром достаточно хорошо изучена, имеются надежные расчетные методики для теплообмена и потерь давления [1], [2]. Специфика однофазного течения заключается в том, что гофрированные пластины, развернутые друг относительно друга на  $180^\circ$ , образуют каналы сложной сетчато-поточной формы. Формируется сеть расширяющихся и сужающихся каналов, что вызывает интенсивную турбулизацию. Теплообмен при кипении в щелевом канале, осложненный наличием гофр, до настоящего времени представляет серьезную задачу не только для инженеров, но и для исследователей, хотя режимы течения в щелевых каналах не имеют принципиальных отличий от двухфазных потоков в вертикальных трубах.

Одно из новейших направлений развития науки в области внутриканального кипения – изучение кипения в малых каналах. Пока это направление является в целом поисковым и результаты данных исследований не нашли широкого практического применения. Известен зарубежный опыт изучения компактных теплообменников в системах охлаждения топливных элементов ядерных и химических реакторов, в тепловых насосах, системах автомобильного кондиционирования и в холодильной технике [2].

В данной работе исследовались кожухотрубные испарители холодильных и теплонасосных установок с поперечным оребрением.

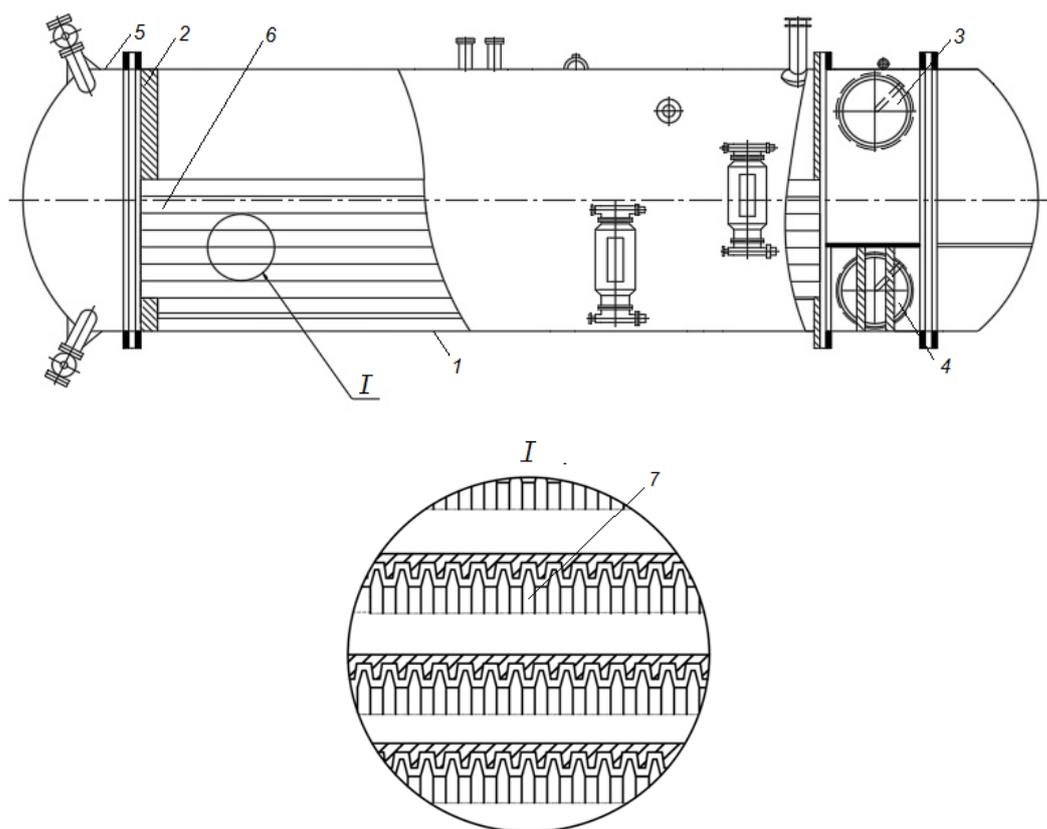


Рис. 1. Фреоновый кожухотрубчатый испаритель затопленного типа с оребренными трубами:  
 1 – кожух; 2 – трубная решетка; 3, 4 – штуцеры для входа и выхода хладоносителя; 5 – крышка; 6 – трубы; 7 – ребра

Экспериментальные исследования проводились на экспериментальном стенде, описанном в [4], в условиях большого объема при давлениях насыщения  $p_n = 0,9-1,4$  МПа и плотностях теплового потока  $q = 5-50$  кВт/м<sup>2</sup> с использованием фреонов R407c, R404a, R410a. Рабочая испарительная камера представляет собой цилиндр, закрытый фланцами, которые имеют стеклянные иллюминаторы для визуального наблюдения за процессами кипения на поверхности образца. На фланце смонтирован разъем для подвода термомпар. Через осевой канал фланца внутрь рабочего образца установлен электрический нагреватель.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы с наружным поперечным оребрением, представляющие собой горизонтальные трубки из дюралюминия, выполненные путем фрезерования и прокатки, с трапецеидальным, треугольным и параболоидным профилем ребра [3].

### **Методика расчета интенсивности теплоотдачи при кипении на оребренной поверхности**

В большинстве случаев при тепловом конструктивном расчете и проектировании теплообменного оборудования известна или задается мощность теплового потока, которую необходимо отводить в процессе теплообмена. Плотность теплового потока может быть выражена через тепловую мощность теплообменника  $Q$ , количество ребер  $n$ , площадь ребер в основании  $f_0$  и межреберную площадь  $f_p$  [6], [7].

Заданные величины: температура в основании ребра  $\vartheta_0$ ; радиус несущей поверхности ребра  $r_0$ ; толщина ребра в основании  $\delta_0$ ; тепловой поток  $Q$ .

Средний температурный напор  $\vartheta_{cp}$  определяется из численного решения дифференциального уравнения ребра при развитом кипении на нем жидкости и полученного при этом распределения температуры по высоте ребра. Высота ребра  $b$  рассчитывается из этого же распределения температуры [8], [10].

Методика расчета оребренной поверхности может быть представлена принципиальной блок-схемой (рис. 2).

Поверочный расчет оребренных поверхностей заключается в определении: тепловой мощности, передаваемой оребренной поверхностью, среднего температурного напора на ребре, распределения температурного напора по высоте ребра, температурного напора в основании ребра и коэффициента теплоотдачи оребренной поверхности [6].

При расчете заданы: длина профиля ребра  $l_p$ ; высота ребра  $b$ ; количество ребер  $n$ ; толщина ребра в основании  $\delta_0$ ; межреберное расстояние  $\delta_{м.р.}$ ; теплофизические постоянные кипящей жидкости и пара; длина оребренной поверхности  $L_p$ ; площадь ребер  $F_p$  (или рассчитывается); общая площадь оребренной поверхности  $F_{общ.}$

В результате поверочного расчета определяются: тепловая мощность, передаваемая оребренной поверхностью  $Q$ ; распределение температурного напора по высоте ребра; температурный напор в основании ребра  $\vartheta_0$ ; средний температурный напор  $\vartheta_p$ ; коэффициент теплоотдачи ребра  $\alpha$ ; плотность теплового потока относительно несущей поверхности  $q_0$  и относительно площади поверхности ребер  $q_p$ .

Методика поверочного расчета оребренной поверхности дана в виде блок-схемы на рис. 3.

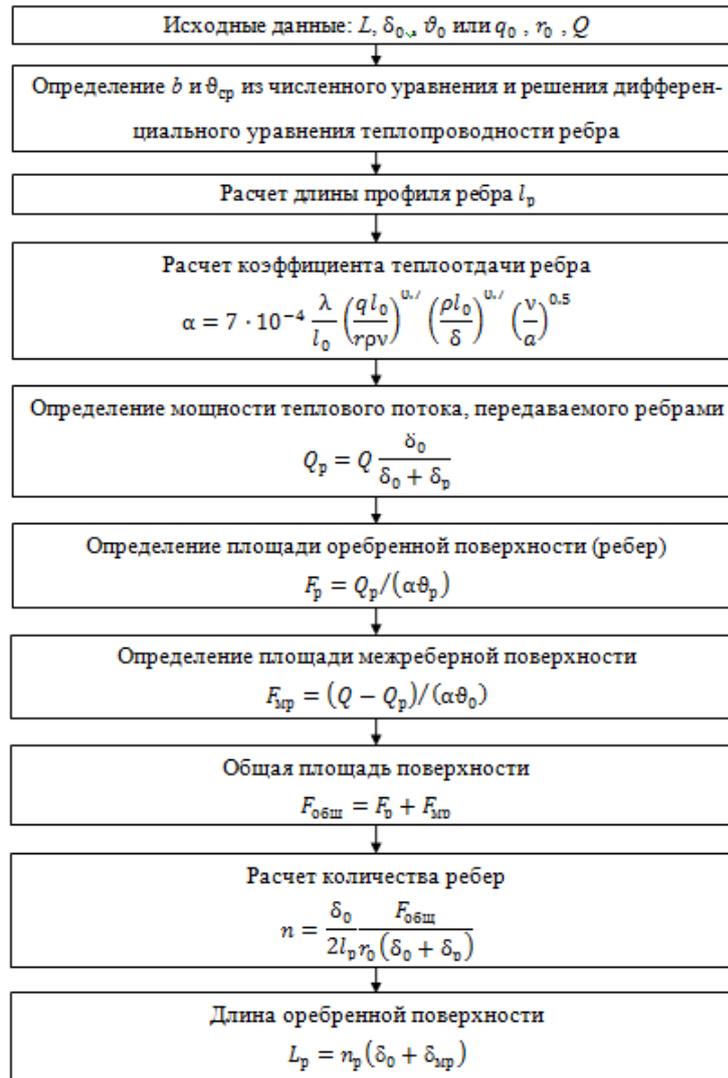


Рис. 2. Блок-схема теплового конструктивного расчета оребренной поверхности

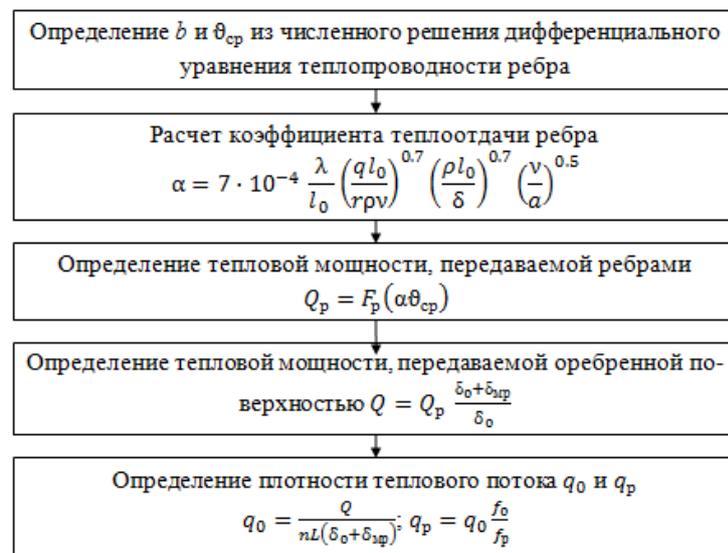


Рис. 3. Блок-схема поверочного расчета оребренной поверхности

Предложенная методика теплового конструктивного расчета оребренной поверхности позволяет определить ее геометрические параметры и общую площадь поверхности теплообмена аппаратов испарительного типа, а также их массогабаритные показатели.

### **Заключение**

Разработан высокоэффективный теплообменный аппарат испарительного типа и предложена методика расчета для определения интенсивности теплоотдачи при парообразовании смесевых озонобезопасных хладагентов на оребренных поверхностях, учитывающая геометрические параметры оребренной поверхности и зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований теплообмена при кипении. Данная методика позволяет рассчитывать геометрические характеристики и общую площадь поверхности теплообмена аппаратов испарительного типа, а также их массогабаритные показатели.

### **Литература**

1. Буренин, В. В. Новые конструкции рекуперативных теплообменных аппаратов для парокомпрессионных холодильных машин / В. В. Буренин // Холодил. техника. – 2004. – № 8. – С. 16–20.
2. Буренин, В. В. Новые теплообменные аппараты для парокомпрессионных холодильных машин / В. В. Буренин // Холодил. техника. – 2012. – № 7. – С. 29–32.
3. Макеева, Е. Н. Интенсивные теплообменные поверхности для испарителей холодильных и теплонасосных установок на смесевых озонобезопасных гидрофторуглеродах / Е. Н. Макеева, О. А. Кныш // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2019. – № 3. – С. 71–76.
4. Исследование тепло- и массопереноса при фазовых превращениях однокомпонентных и смесевых озонобезопасных хладагентов : отчет о НИР (заключ.) / ГГТУ им. П. О. Сухого ; рук. темы А. В. Овсянник. – Гомель, 2015. – 101 с. – № ГР 20141921.
5. Кутилов, В. Современные теплообменники / В. Кутилов // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2011. – № 7 (115). – С. 66–68.
6. Овсянник, А. В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей / А. В. Овсянник. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – 284 с.
7. Овсянник, А. В. Обобщенные расчетные зависимости для определения интенсивности теплообмена при кипении смесевых хладагентов / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева // Холодил. техника. – 2015. – № 12. – С. 33–37.
8. Овсянник, А. В. Расчет и подбор высокоэффективного испарительного оборудования теплонасосных установок / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева // Эколого-энергетические проблемы современности : сб. науч. тр. Всеукраин. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов. – Одесса, 2017. – С. 50–51.
9. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г. Н. Данилова [и др.] ; под общ. ред. Г. Н. Даниловой. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 303 с.
10. Шуршев, В. Ф. Алгоритм и методика расчета испарителя холодильной машины, работающей на смеси холодильных агентов / В. Ф. Шуршев // Вестн. АГТУ. – 2005. – № 1 (24). – С. 91–96.

*Получено 03.02.2021 г.*