

П. Н. Ребров, В. Г. Букин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ФРЕОНА R22 В ЗАТОПЛЕННЫХ ИСПАРИТЕЛЯХ КРУПНЫХ ФРЕОНОВЫХ ТУРБОКОМПРЕССОРНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Объектами исследования являются экспериментальный испаритель, модель крупной фреоновой холодильной установки, технически чистый фреон R22. Цель работы – оценить влияние рядности пучка и режимных параметров (давления насыщения и температуры насыщения) на теплоотдачу при кипении технически чистого фреона в многорядных гладкотрубных пучках, а также продолжить изучение особенностей процесса кипения фреонов в испарителях крупных холодильных машин. Получены расчетные зависимости влияния режимных параметров на теплоотдачу при кипении фреонов R12 и R22 в затопленных испарителях с большой высотой экспериментального пучка. Описаны визуальные наблюдения процесса кипения. Получены расчетные зависимости распределения теплоотдачи на трубах по рядам пучка, определен характер изменения теплоотдачи на трубах пучка и распределения температуры по высоте экспериментального пучка.

**Ключевые слова:** холодильные установки, теплоотдача, кипение, испаритель, фреон.

### Введение

Для холодильных машин производительностью более 500 кВт основным видом испарителей являются кожухотрубные аппараты для охлаждения жидкого теплоносителя с большой теплообменной поверхностью (порядка 2000 м<sup>2</sup>) с числом труб по вертикали  $n > 40$ , в которых кипение происходит на поверхности многорядных пучков труб. Известно, что совершенство испарительных аппаратов в значительной степени определяется условиями теплообмена при кипении, поэтому до сих пор кожухотрубные испарители продолжают оставаться объектом исследования, а изучение процесса теплообмена хладагентов на многорядных пучках труб имеет большое научно-практическое значение.

**Целью исследования** являлось получение экспериментальных данных и расчетных зависимостей для теплоотдачи при кипении фреона R22 на многорядном пучке гладких труб.

Технические поверхности труб пучка соответствуют поверхностям реальных аппаратов. Для пучка № 1 ( $N_p = 30$ ) была взята стальная гладкая труба промышленного изготовления со следующими параметрами: диаметр –  $d = 22$  мм; длина –  $l = 350$  мм, шероховатость  $Rz = 5 \dots 6$  мкм;  $S/d = 2,5$ . Эксперименты выполнялись в диапазоне плотности теплового потока  $q = 1 \dots 15$  кВт/м<sup>2</sup> и температуры насыщения  $t_n = +10 \dots -30$  °С.

### Результаты исследования

**Результаты визуальных наблюдений.** В ходе исследования отмечалось, что картина кипения хладагента на многорядном пучке изменялась в зависимости от плотности теплового потока и давления. Так, при  $t_n = -10$  °С на верхних трубах первые паровые пузырьки появлялись при плотности теплового потока  $q < 2,0$  кВт/м<sup>2</sup>. Паровые пузырьки начинали появляться в местах заделки термопар в центральной части трубы. Сопоставление визуальных наблюдений с результатами замеров показало, что эти паровые пузырьки не оказывают заметного влияния на теплоотдачу. С увеличением плотности теплового потока центры парообразования активизируются и парообразование равномерно распространяется по всей поверхности трубы вглубь пучка, охватывая нижележащие трубы. При  $q = 5$  кВт/м<sup>2</sup> и  $t_n = -10$  °С парообразование отмечалось на всех трубах пучка. На нижних трубах образовавшиеся паровые пузырьки имели меньшие размеры и скорость подъема, чем на верхних. Визуально было отмечено, что в нижней части пучка образовавшиеся паровые пузырьки поднимались вверх и на некотором промежутке пути практически не изменялись в размерах. Протяженность этого пути зависела от плотности теплового потока и давления и с их ростом уменьшалась. Но даже при  $q = 18$  кВт/м<sup>2</sup> и  $t_n = -10$  °С путь, пройденный пузырьком без заметного изменения размеров, составил примерно 0,1 м. Как показали измерения, это связано с тем, что нижние ряды пучка омывались несколько переохлажденной жидкостью.

Пар, образующийся на нижних трубах пучка, движется вверх, вместе с жидкостью формируя парожидкостную смесь с непрерывно возрастающим паросодержанием, вследствие чего плотность среды постоянно менялась.

**Результаты экспериментов по кипению фреона R22 на поверхности 30-рядного гладкотрубного пучка.** Анализ результатов экспериментов по кипению R22 на поверхности 30-рядного гладкотрубного пучка показал их качественную сходимость с результатами, полученными при кипении фреона R22 на одиночных трубах и малорядных гладкотрубных пучках [1–3]. В количественном отношении результаты были в среднем на 25 % выше, чем в сопоставимых условиях. Следует также отметить, что при кипении фреона R22 влияние пучка на средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  проявляется несколько меньше, чем для фреона R12, а влияние давления при низких значениях давления насыщения  $P_n$  на теплоотдачу верхних труб становится отрицательным. Снижение давления насыщения, во-первых, приводит к изменению теплофизических свойств хладагента, в результате чего снижается интенсивность теплоотдачи и уменьшается  $\alpha$ . Это сказывается в основном на нижних трубах пучка. Во-вторых, при низких значениях  $P_n$  значительно увеличивается объём пара, приходящийся на единицу поверхности. Это приводит к большей турбулизации потока, особенно для верхних труб пучка, поэтому в данном случае турбулизирующее воздействие двухфазного потока оказывает большее интенсифицирующее воздействие, чем факторы, приводящие к ее снижению при низких значениях  $P_n$ . Аналогичное влияние давления на теплоотдачу было отмечено в опытах В. К. Бельского и Н. М. Поволоцкой [1, 2].

При переходе в зону кипения на нижней трубе интенсивность теплоотдачи возрастает, увеличивается влияние плотности теплового потока и давления. С возрастанием плотности теплового потока увеличивается число действующих центров парообразования, что интенсифицирует теплоотдачу. Сопоставление результатов измерений и визуальных наблюдений показало, что на нижних трубах отдельные паровые пузыри не оказывают заметного влияния на средний коэффициент теплоотдачи – это влияние начинает проявляться только при возрастании  $q$  примерно на 50 %. При такой обработке во всех опытах не отмечалось стабилизации теплоотдачи при переходе от нижних труб к верхним, более того, опыты с малым уровнем заполнения испарителя, когда верхние трубы находились не под слоем жидкости, а в пенном слое, показали, что теплоотдача на них значительно возросла, поэтому можно сделать вывод, что и при большом числе труб теплоотдача будет расти. Согласно результатам экспериментов, постоянное увеличение теплоотдачи по высоте пучка говорит об отсутствии запаривания теплообменной поверхности. Теплоотдача на верхних рядах характеризуется аналогичной качественной зависимостью, но с некоторыми количественными отклонениями. Так, влияние плотности теплового потока на  $\alpha$  проявляется в меньшей степени. Данное обстоятельство связано с тем, что большое количество крупных паровых пузырей, образовавшихся в нижележащем объеме, соприкасаясь с греющей поверхностью через микрослой жидкости, значительно интенсифицирует теплоотдачу, а дальнейшая активизация центров парообразования, вызванная увеличением  $q$ , все меньше интенсифицирует  $\alpha$ .

При высоких значениях плотности теплового потока  $q = 25 \text{ кВт/м}^2$ , когда теплообмен при кипении является определяющим, теплоотдача стабилизируется и мало зависит от высоты расположения трубы. При малых значениях  $P$  теплоотдача по высоте пучка значительно возрастает при переходе от нижних рядов к верхним.

С ростом давления интенсивность теплоотдачи при  $q = \text{const}$  возрастает и влияние рядности уменьшается. Зависимость  $\alpha = f(q)$  для нижней трубы пучка и одиночной трубы, условия работы которых сопоставимы, аналогичны. Влияние давления на  $\alpha$  также зависит от положения трубы. На верхних трубах давление практически не влияет на теплоотдачу, на нижних это влияние соответствует зависимости  $\alpha = f(P)$  для одиночных труб. При кипении с возрастанием давления уменьшается критический радиус парового зародыша и увеличивается число действующих центров парообразования, что приводит к увеличению интенсивности теплоотдачи. Влияние давления и плотности теплового потока на среднюю теплоотдачу пучка сказывается в меньшей степени, чем при кипении на одиночной трубе (рис. 1).

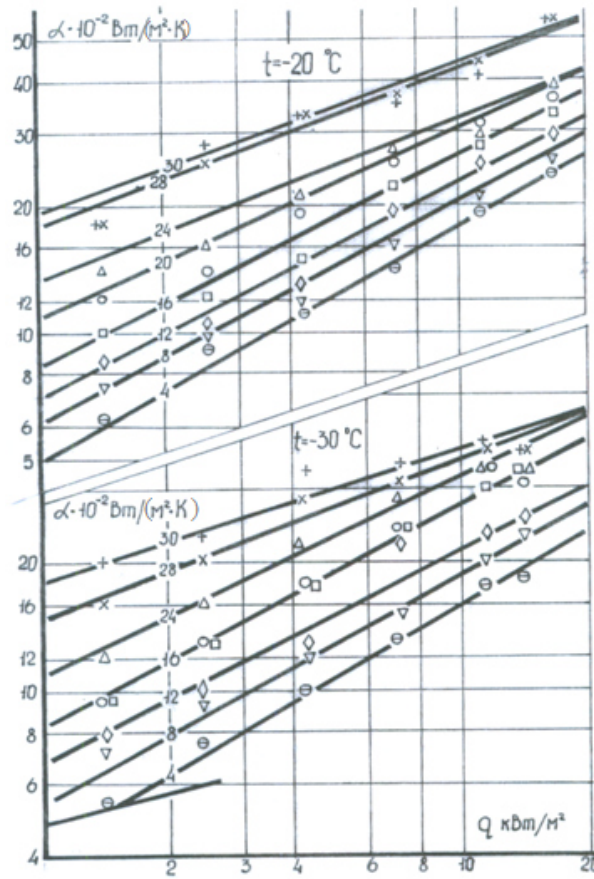


Рис. 1. Зависимость локальных коэффициентов теплоотдачи от плотности теплового потока при кипении фреона R22 на многорядном гладкотрубном пучке при  $t_n = -30\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $N_p = 15$ ,  $S/d = 2,5$ .  
Трубы пучка: + – 1-я; x – 2-я;  $\Delta$  – 4-я; O – 6-я;  $\square$  – 8-я;  $\diamond$  – 10-я;  $\nabla$  – 12-я;  $\ominus$  – 14-я

На рис. 2 представлена зависимость изменения  $\alpha = f(N_p)$  при различных значениях температуры  $t_n$  по высоте пучка, из которой видно, что в нижних рядах находится переохлажденная жидкость. Поэтому для организации пузырькового кипения требуется бóльший перегрев пристенного слоя. При движении жидкости вверх и подводе тепла ее температура повышается и достигает температуры насыщения, соответствующей давлению  $P = P_n + \rho gH$ , при этом визуально наблюдается рост количества паровых пузырей в объеме и их размеров. При дальнейшем подъеме жидкости ее температура понижается (вследствие понижения  $P$ , вызванного уменьшением столба жидкости), оставаясь равной  $t_n$ .

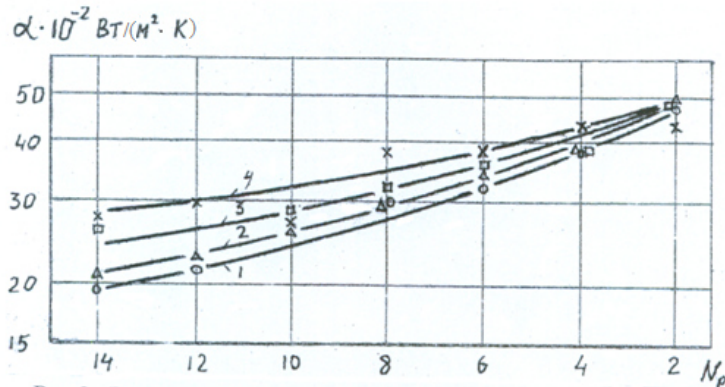


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от рядности  $N_p$  при  $t_n = -30 \dots 0\text{ }^\circ\text{C}$ :  
1 –  $t_n = -30\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_n = -20\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_n = -10\text{ }^\circ\text{C}$ ; 4 –  $t_n = 0\text{ }^\circ\text{C}$

В опытах средний коэффициент теплоотдачи 30-рядного гладкотрубного пучка получился значительно выше, чем на одиночной гладкой трубе.

### Выводы

Теплоотдача при кипении чистого фреона R22 на многорядном гладкотрубном пучке более интенсивна, чем на малорядном в сопоставимых условиях, однако стабилизации теплоотдачи и эффекта запаривания теплообменной поверхности в ходе экспериментов не наблюдалось. Следует отметить, что влияние давления насыщения  $P_n$  в условиях работы кожухотрубных испарителей настолько мало, что им можно пренебречь. В результате наблюдений за гидродинамикой потока в опытах установлено, что при кипении на многорядных пучках существуют не только режимы конвекции и пузырькового кипения, но и вспененный режим течения двухфазного потока. Принятые представления объясняют качественные и количественные различия экспериментальных данных при кипении на пучках различной рядности. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и эксплуатации крупных испарителей турбокомпрессорной холодильной установки холодопроизводительностью более  $5 \cdot 10^6$  кВт.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельский В. К. Исследование теплообмена при кипении фреона-12 на пучке трубок и одиночных очехленных трубках // Холодильная техника. 1970. № 2. С. 40–44.
2. Поволоцкая Н. М. Исследование коэффициентов теплоотдачи при кипении фреона-22 на одиночной трубке и пучке горизонтальных труб // Холодильная техника. 1968. № 7. С. 20–25.
3. Поволоцкая Н. М. О кипении фреонов на пучках труб // Холодильная техника. 1969. № 10. С. 33–38.

Статья поступила в редакцию 14.04.2017

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ребров Павел Николаевич** – Россия, 414056, Астрахань, Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук; доцент кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; vodoley302@mail.ru.

**Букин Владимир Григорьевич** – Россия, 414056, Астрахань, Астраханский государственный технический университет; г-р техн. наук; профессор кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; vodoley302@mail.ru.



*P. N. Rebrov, V. G. Bukin*

### STUDY OF FREON R22 HEAT TRANSFER IN FLOODED EVAPORATORS AT LARGE FREON REFRIGERATING TURBOMACHINERY

**Abstract.** The object of research includes the experimental evaporator, the model of a large Freon refrigeration plant, and technical-grade Freon R22. The purpose of the research is to assess the effect of the tube bank lane and regime parameters (saturation pressure and saturation temperature) on heat transfer during technical-grade Freon boiling in multi-row tube banks, as well as to continue studying the features of freon boiling processes in the evaporators of large refrigerating machines. The article shows the calculated dependences of the influence of regime parameters on heat transfer in the process of boiling Freon R12 and R22 in flooded evaporators with great height

of experimental tube bank. The visual observations of the boiling process have been described. Calculated dependences of heat transfer along the tubes in the tube bank have been obtained, the character of heat transfer changes and temperature distribution according to the height of the tube bank has been defined.

**Key words:** Refrigerating plants, heat transfer, boiling, evaporator, freon.

REFERENCES

1. Bel'skii V. K. Issledovanie teploobmena pri kipenii freona-12 na puchke trubok i odinochnykh ochekhlennykh trubkakh [Study of heat exchange in the process of Freon 12 boiling in the tube bank and in separate shell tubes]. *Kholodil'naia tekhnika*, 1970, no. 2, pp. 40-44.
2. Povolotskaia N. M. Issledovanie koeffitsientov teplotdachi pri kipenii freona-22 na odinochnoi trubke i puchke gorizonta'nykh trub [Analysis of the heat transfer coefficients during Freon 22 boiling in a separate tube and in horizontal tube bank]. *Kholodil'naia tekhnika*, 1968, no. 7, pp. 20-25.
3. Povolotskaia N. M. O kipenii freonov na puchkakh trub [On freon boiling in the tube banks]. *Kholodil'naia tekhnika*, 1969, no. 10, pp. 33-38.

The article submitted to the editors 14.04.2017

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Rebrov Pavel Nikolaevich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Power Engineering and Refrigerating Machinery; vodoley302@mail.ru.

**Bukin Vladimir Grigorevich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences; Professor of the Department of Power Engineering and Refrigerating Machinery; vodoley302@mail.ru.

