

14. Справочник по климату СССР. Вып. 7. Белорусская ССР. Ч. III. – Л.: Гидрометеоздат, 1966. – 156 с.
15. Справочник по климату СССР. Вып. 7. Белорусская ССР. Ч. IV. – Л.: Гидрометеоздат, 1968. – 264 с.
16. Климат Беларуси / Под ред. В.Ф. Логинова. – Мн.: Институт геологических наук АН Беларуси, 1996. – 234 с.
17. Зайцев И.Д., Зозуля А.Ф., Асеев Г.Г. Машинный расчет физико-химических параметров неорганических веществ. – М.: Химия, 1983. – 256 с.
18. Методы расчетов процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк, М.И. Курочкина. – С.-Пб.: Химия, 1993. – 496 с.
19. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. – С.-Пб.: Химия, 1994. – 432 с.

УДК 541.18.045:66.0

А. И. Ершов, профессор; Ю. П. Лунчук, инженер

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТА С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ**

The results of experimental research of exchange intensity apparatus with horizontal profiling heaters are given. The dependence of coefficient of heat transmission  $K$  upon driving forces of the exchange process has been received  $\Delta t$ .

Теплообмен между кипящей жидкостью в неограниченном объеме и конденсирующимся паром в горизонтальных трубах и каналах широко применяется в выпарных аппаратах, паровых котлах, химических реакторах и относится к числу самых сложных, т. к. связан с фазовым превращением обоих теплоносителей. Он может осуществляться как при естественной, так и при принудительной циркуляции кипящей жидкости у поверхности стенок нагревательных устройств. Исследованиями установлено [1, 2], что интенсивность теплообмена возрастает с увеличением скорости внешнего обтекания теплопередающих поверхностей и при вынужденном движении жидкости технически легко реализуема. Однако на практике в большинстве случаев указанные тепловые процессы проводятся при естественной конвекции, которая во многом зависит от геометрии и конструктивного оформления самих теплообменных устройств.

Ранее, применительно к выпарным аппаратам для концентрирования растворов с минимальными температурными потерями на гидростатический эффект, было предложено новое техническое решение горизонтального нагревательного устройства с плоскоовальными трубами [3, 4]. Благодаря их секционированному расположению возникает хорошо организованный контур циркуляции кипящей жидкости вместе с образующимися пузырьками пара в зазорах между трубками вверх, а в зазорах между секциями вниз из-за существенной разности плотностей восходящего и нисходящего потоков. Последнее обусловлено тем, что поверхность стенок, приходящаяся на единицу объема воспринимающей тепло среды, в зазорах между соседними трубами заметно больше, чем в зазорах между секциями.

Разработка методики теплового расчета таких нагревательных устройств потребовала проведения исследований, которые выполнялись авторами в несколько этапов. На

первоначальной стадии изучались закономерности теплообмена на моделях с различной формой плоскоовальных элементов при разности температур теплоносителей  $\Delta T = 6-30$  °С. При этом упариваемой служила водопроводная вода, а давление греющего пара изменялось от 0,12 до 0,25 МПа. Результаты исследований опубликованы в трудах БГТУ (выпуск VII, серия «Химия и химическая технология», 1999 г.).

В настоящей статье приводятся данные экспериментальных исследований особенностей теплообмена между кипящей жидкостью и конденсирующимся паром на нескольких моделях секционированных нагревательных устройств:

1) с девятью плоскоовальными элементами, эквивалентный диаметр которых составлял  $d_э = 18$  мм, с зазором между секциями  $a = 6$  мм и отношением зазора между секциями к зазору между элементами  $\sim 2,5$ ;

2) с девятью плоскоовальными элементами, эквивалентный диаметр которых составлял  $d_э = 12$  мм, с зазором между секциями  $a = 6$  мм и отношением зазора между секциями к зазору между элементами  $\sim 2,5$ ;

3) с тремя плоскоовальными элементами, эквивалентный диаметр которых составлял  $d_э = 18$  мм, с зазором между элементами  $a = 5$  мм;

4) с тремя плоскоовальными элементами, эквивалентный диаметр которых составлял  $d_э = 12$  мм, с зазором между элементами  $a = 7,5$  мм.

В качестве модельных жидкостей использовалась водопроводная вода и растворы 50% карбамида, 50% капролактама, свойства которых приведены в таблице 1. Их выбор определялся, во-первых, необходимостью изменения в широких пределах вязкости, поверхностного натяжения, теплопроводности, теплоемкости, а во-вторых, возможностью практического использования новых выпарных аппаратов в производстве данных продуктов.

Таблица 1

Свойства модельных растворов

Растворы	Давление вторичного пара в ата	Физико-химические свойства растворов				
		Температура кипения в °С	Теплопроводность в Вт/(м К)	Вязкость в $10^6 \cdot \text{м}^2/\text{с}$	Теплоемкость в Дж/(кг К)	Поверхностное натяжение в Н/м
Вода	1	100	0,683	0,295	4230	0,061
водопроводная	0,55	83	0,677	0,340	4190	0,063
Карбамид	1	107	0,495	0,496	3270	0,054
50% масс.	0,55	90	0,494	0,590	3270	0,061
Капролактама	1	102	0,310	0,881	3840	0,037
50% масс.	0,55	85	0,310	1,202	3740	0,040

На завершающей стадии проведена серия опытов по упариванию растворов карбамида и капролактама в условиях вакуума при давлении 0,055 МПа. Это было сделано с целью изучения условий масштабного перехода для случаев многократного концентрирования растворов, когда давление внутри аппаратов может изменяться от избыточного до глубокого вакуума.

Во время эксперимента температуры греющего и вторичного паров кипящей жидкости измерялись хромель-копелевыми термопарами, заделанными в нержавеющие капилляры толщиной 1 мм. Количество пара, образующегося при кипении жидкости, определялось в опытах по количеству вторичного конденсата. Данные, полученные в результате проведенных экспериментов, использовались для расчета коэффициентов теп-

лопередачи и удельного паросъема, значения которых приведены на рисунке и в таблице 2. Согласно рисунку величина коэффициентов теплопередачи возрастает с увеличением полезной разности температур для всех четырех исследованных конструктивных вариантов практически одинаково. В свою очередь, заметное влияние оказывает ширина зазора между плоскоовальными трубами в секциях. Самые низкие значения коэффициентов теплопередачи оказались при ширине зазора  $a = 5$  мм, а максимальные при  $a = 7,5$  мм. Объяснить такое явление можно стесненными условиями для циркуляции кипящего раствора с пузырьками пара вверх в конструктивном варианте 3 и развитой свободной циркуляцией его в варианте 4. В пользу данного обоснования свидетельствует промежуточное положение зависимостей  $K = f(\Delta T)$  для вариантов 1 и 2, у которых ширина зазора  $a = 6$  мм. Вместе с тем близость расположения усредненных линий 1 и 2 говорит за то, что эквивалентный диаметр самих плоскоовальных труб незначительно влияет на величину коэффициента теплопередачи. Согласно табличным данным, максимальный удельный паросъем достигается при соотношении ширины зазоров между секциями к ширине зазоров между трубами в секциях 2,5 и соотношении высоты самих плоскоовальных труб к их ширине 7.

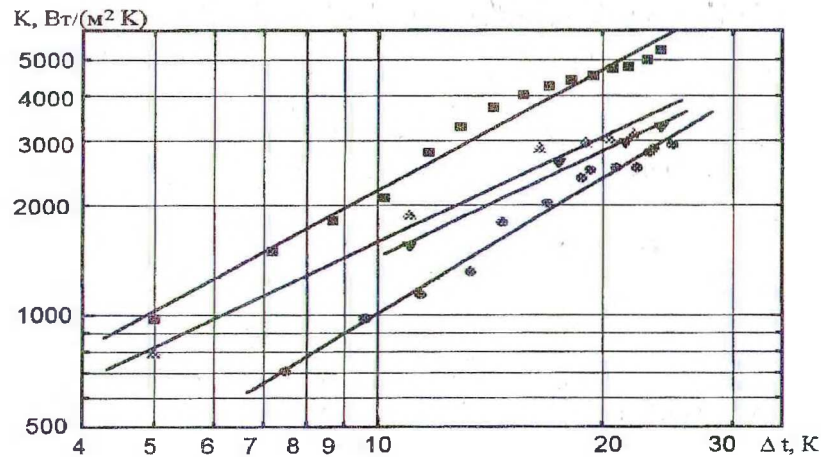


Рис. Зависимость коэффициента теплопередачи от движущей силы  $\Delta T$  теплового процесса для 4-х вариантов секционированных теплообменных устройств:  
 ▼ - 1 вариант, \* - 2 вариант, ◊ - 3 вариант, ■ - 4 вариант

Таблица 2

#### Удельный паросъем для различных растворов

	Удельный паросъем $W$ , кг/(м <sup>2</sup> ·час), при движущей силе $\Delta T$ (град)		
	10	15	20
Вода	40	87	147
Карбамид 50% масс.	36	64	101
Капролактан 50% масс.	28	52	81

Анализ полученных результатов говорит также о том, что наличие вакуума в зоне кипения негативно сказывается на интенсивности теплопередачи и удельном паросъеме. Например, при разности температур  $\sim 20$  °С удельный съем пара при атмосферном

давлении составлял  $146 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  для воды и  $\sim 85 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  для 50%-ного раствора капролактама, а при вакууме  $0,55 \text{ ата}$   $\sim 97$  и  $48 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  соответственно. По литературным источникам [5] подобное явление имеет место и в выпарных аппаратах с вертикальными трубчатыми нагревателями-испарителями.

В целом результаты проведенных исследований свидетельствуют об идентичности общих физических закономерностей, установленных для тепловых процессов при кипении жидкостей в неограниченном объеме, и тем самым подтверждают корректность постановки опытов. Кроме того, кинетические параметры, полученные для воды и водных растворов неорганических веществ, превосходят таковые для растворов органических веществ, что также согласуется с известными закономерностями. Сравнительная технико-экономическая оценка технических решений с горизонтальными и вертикальными нагревательными устройствами применительно к процессам выпаривания растворов показывает определенные преимущества первого варианта над вторым и подтверждает перспективность использования выпарных аппаратов с минимальными температурными потерями на гидростатический эффект для концентрирования растворов в химической, пищевой, фармацевтической и др. отраслях промышленности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ирвайн Т., Хартнетт Дж. Успехи теплопередачи. – М.: Мир, 1971. – С. 98-117.
2. Сэсс, Сперроу. Пленочное кипение в пограничном слое при вынужденном движении // Труды амер. об-ва инж.-мех., сер. С. Теплопередача. № 3. 1961. – С. 175-183.
3. Ершов А. И., Лунчук Ю. П., Плехов И. М. Разработка и исследование энергоэкономичных выпарных аппаратов // Материалы МНТК «Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности». Мн., 1998. – С. 52-54.
4. Ершов А. И., Лунчук Ю. П., Рабко А.Е. Интенсивность теплообмена в аппаратах с профилированными нагревательными устройствами // Материалы ММФ-96 «Теплообмен». Том XI. Мн., 1996. – С. 187-189.
5. Гельперин Н.И., Коробков Е. И. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении жидкостей // Химическое и нефтяное машиностроение. № 4. 1969. – С. 10-13.