

О.И. Ершов, Н.П. Саевич, Д.Г. Калишук

## ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПАРА В ЖИДКОСТЬ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОБМЕНА ПРИ МАЛЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЕРЕПАДАХ МЕЖДУ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

Одним из путей снижения энергозатрат на проведение технологических процессов является утилизация вторичного тепла. Например, в ректификационных установках, предназначенных для разделения сложных смесей и содержащих несколько последовательно работающих полных аппаратов, пары дистиллята и флегмы высокотемпературной колонны можно направить на конденсацию в испаритель низкотемпературной колонны, используя при этом их тепло /1,2/.

В работе /3/ приводится техникоэкономическая оценка целесообразности использования тепла паров дистиллята и флегмы при разделении продуктов окисления циклогексана в производстве капролактана, где разность температур верха высокотемпературной колонны и низа низкотемпературной колонны не превышает 22 К. На основании такой оценки для получения гарантированного положительного экономического эффекта при утилизации тепла необходимо интенсифицировать процесс теплообмена.

Известно /4,5/, что интенсификации теплообмена между конденсирующейся и кипящей средами можно достичь за счет ввода острого пара в кипящую жидкость. Однако научная информация о закономерностях теплообмена с вводом острого пара в кипящую жидкость при малых температурных напорах отсутствует.

Авторами были выполнены экспериментальные исследования влияния ввода острого пара на входном участке обогреваемой трубы высотой 1 м и диаметром 16х1,5 мм при температурных напорах между теплоносителями до 15 К. Во время проведения опытов менялись температурный напор, уровень свободной жидкости в трубе, а также соотношение расходов острого пара и испарившейся жидкости.

Модельной средой служила дистиллированная вода. Погрешность измерения расходов не превышала 3%, температура определялась с точностью 0,5 К.

Результаты экспериментальных исследований частично представ-

лени на рис. 1 в виде зависимостей величины удельного теплового потока  $q$  от температурного напора  $\Delta T$  при различных значениях уровня светлой жидкости  $h$  и соотношениях расходов острого пара и испарившейся жидкости  $\epsilon$ .

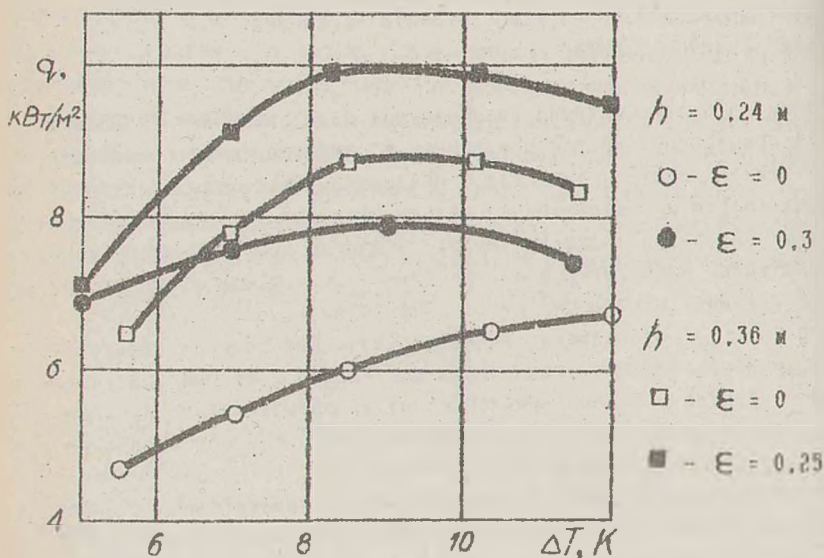


Рис. 1. Зависимость  $q$  от  $\Delta T$  при различных значениях  $h$  и  $\epsilon$ .

Согласно полученным результатам:

1) при малых температурных напорах интенсивность теплообмена возрастает с вводом острого пара в жидкость, причем увеличение удельного теплового потока достигает 50 % при  $\epsilon = 0,2 - 0,3$ ;

2) при повышении температурного напора и с увеличением высоты уровня светлой жидкости более 50 % от высоты труб интенсифицирующий эффект снижается;

3) для достижения интенсификации теплообмена в кожухотрубных вертикальных испарителях требуется равномерное распределение пара по трубам, т. к. ощутимый положительный эффект наблюдается в узком диапазоне значений  $\epsilon$ .

На практике равномерность распределения пара в многотрубных аппаратах достигается за счет применения калиброванных отвер-

нии малого диаметра в боковой стенке труб на входном участке и поддержанию значительного уровня паровой подушки под трубной решеткой /6/. Как известно, в кубовой жидкости при ректификации содержатся механические примеси и смолообразующие вещества, поэтому распределители с калиброванными отверстиями будут быстро забиваться.

Парораспределители же в виде дырчатых листов /4/ просты, не склонны к загрязнению, однако они не обеспечивают четкого распределения и требуют высокой точности установки при монтаже.

Авторами разработана конструкция парораспределителя, отличительной особенностью которой является наличие двух ступеней распределения. Положительный эффект достигается за счет того, что в предложенном распределителе амплитуда поперечных миграций пузырей газа мала. Нами были проведены сравнительные испытания новой конструкции и дырчатого листа на модели теплообменника промышленного масштаба с трубным пучком, содержащим 61 трубу диаметром 18х1,5 мм. В качестве модельных сред использованы воздух и вода, причем удельные нагрузки по воздуху  $q$  изменялись от 0,05 до 0,5 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с), а по жидкости  $l$  - от 0,005 до 0,05 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с). При проведении опытов также имитировались перекосы распределителей.

Равномерность распределения оценивалась по величине объемных газосодержаний  $\alpha$  в трубах, расположенных в радиальной плоскости трубного пучка. Газосодержание определялось по уровню светлой жидкости в измерительных трубках, подключенных по принципу сообщающихся сосудов к трубам трубного пучка. В измерительных трубках были установлены линейные электроды. Уровень светлой жидкости вычислялся как функция падения напряжения на электродах.

Некоторые результаты испытаний двухступенчатого распределителя при различных нагрузках по фазам представлены на рис. 2.

Количественная оценка характера газораспределения осуществлялась коэффициентом неравномерности  $e$ , который определялся по зависимостям

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n |1 - \bar{\alpha}_i|}{n}; \quad (1)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{|\alpha_i - \alpha_{cp}|}{\alpha_{cp}}, \quad (2)$$

где  $\alpha_i$  - относительное газосодержание в  $i$ -й точке измерения;  $N$  - количество точек измерения;  $\alpha_i$  - газосодержание в  $i$ -й точке измерения;  $\alpha_{cp}$  - среднее газосодержание.

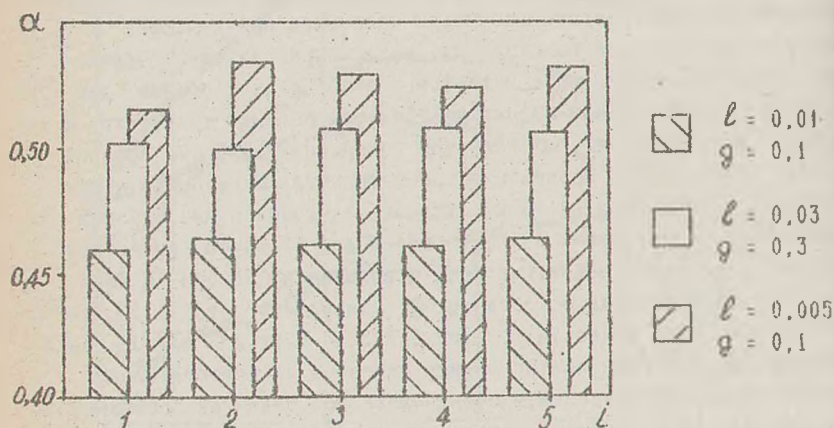


Рис. 2. Гистограммы газосодержаний  $\alpha$  в зависимости от  $l$  и  $g$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .  $i$  - номер точки измерения

Сравнительный анализ показал, что двухступенчатый газораспределитель обеспечивает более равномерное распределение газа по сравнению с дырчатым листом. Коэффициент неравномерности  $\mu$  двухступенчатого распределителя изменяется от 0,006 до 0,025, у дырчатого листа (при условии строго горизонтальной установки его) - от 0,018 до 0,045. Максимальное отклонение локального расхода газа от среднего его значения по сечению трубного пучка при использовании дырчатого листа достигает 30 %, а при использовании двухступенчатого распределителя составляет не более 10 %.

Согласно полученным результатам, разработанная конструкция обеспечивает стабильное распределение двухфазной среды в трубном пучке. Распределитель может быть смонтирован в стандартные тепло-



обменники без предварительных конструктивных изменений последних, он мелочувствителен к загрязнениям. Устойчивая работа устройства возможна при значительных перекосах (до 30 мм на 1 м длины).

Предложенный метод интенсификации теплообмена и устройство распределения пара (газа) в кожухотрубчатых аппаратах заложены в проектные решения по реконструкции ректификационной установки /2/ производства капролактама Гродненского ПО "Азот". Реализация проекта позволит экономить 8 - 12 тыс. Гкал тепловой энергии в год.

### Л и т е р а т у р а

1. Савевич Н.П., Ершов А.И., Калишук Д.Г. Аппаратурно-технологическое решение утилизации вторичного тепла при малых температурных напорах // Труды Белорусского государственного технологического университета. Сер. III. - Мн., 1994. - Вып. II. - С. 74-78.

2. А.с. 1386217 СССР. МКИ4 В01D3/32. Установка для ректификации многокомпонентных смесей / А.И. Ершов и др. // Бюл. изобр. - 1988. - № 13.

3. Калишук Д.Г. Техноэкономическая оценка эффективности работы тепломассообменных установок // Труды Белорусского технологического института. Химия и технология неорганических веществ. Сер. III - Мн., 1993. - Вып. 1. - С. 56-59.

4. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. - М.: Высшая школа, 1986. - 448 с.

5. Гаубман Е.И. Выпаривание. - М.: Химия, 1982. - 328 с.

6. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. - Л.: Машиностроение, 1976. - 216 с.