

Д.Г.Калишук, Н.П.Саевич, А.И.Ершов

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОМАССОБМЕНА, РЕКУПЕРАЦИИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ПРИ МАЛЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЕРЕПАДАХ МЕЖДУ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

Белорусский государственный технологический университет

Энергоемкость производственных процессов может быть снижена за счет рекуперации и утилизации тепла технологических потоков, сред. Реализация энергосберегающих технологий такого рода зачастую сдерживается тем, что теплообмен необходимо осуществлять при малых температурных перепадах между теплоносителями. Поэтому для осуществления указанных проектов требуются дорогостоящие, с большими поверхностями теплопередачи теплообменники. Для удешевления технологий рекуперации и утилизации тепла, в первую очередь за счет снижения капитальных затрат на их реализацию, и расширения круга их применения необходима интенсификация теплообмена. Задачу, подобную упомянутой выше, приходится также решать при разработке аппаратурно-технологического оформления нагрева термочувствительных сред.

Если в процессе теплообмена принимающим теплоносителем является кипящая жидкость, а отдающим – конденсирующийся пар, то при малых температурных перепадах между ними общую интенсивность процесса, как правило, лимитирует теплоотдача в кипящей жидкости. В работе /1/ представлен обзор конструктивных и технологических методов интенсификации кипения, в том числе за счет диспергирования газа в кипящую жидкость. В монографиях /2,3/ упоминается, что интенсификация кипения достигается при диспергировании острого пара в кипящую жидкость. Ранее авторами настоящего доклада были проведены экспериментальные исследования интегральных характеристик теплообмена при кипении воды в вертикальной трубе с интенсификацией процесса за счет диспергирования острого пара в жидкость на начальном участке. В результате подтверждено интенсифицирующее воздействие острого пара на теплообмен, получены значения удельных тепловых потоков при кипении с интенсификацией, до полутора раз превышающие их величины без интенсификации. Оценено также влияние температурного перепада между теплоносителями, соотношения расходов острого пара и испаренной жидкости, уровня слоя светлой жидкости на степень интенсификации /4/.

С целью уточнения влияния различных факторов на локальную интенсивность теплообмена при кипении жидкости в вертикальной трубе с диспергированием острого пара на начальном участке нами создана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1. Опытной ячейкой установки является испаритель 10, представляющий собой вертикальный двухтрубный теплообменник. Внутренняя труба испарителя выполнена из меди и имеет внутренний диаметр 20 мм при толщине стенки 4 мм. Высота обогреваемого участка ее составляет 1 м. В стенку медной трубы завальцованы на различных уровнях термопары (диаметр кожуха 1 мм), предназначенные для измерения ее температуры в ходе эксперимента. При проведении опытов труба заполняется жидкостью, поступающей самотеком из термостата 21. Обогрев трубы осуществляется насыщенным водяным паром, который подается в кожух испарителя 10 из парогенератора 22. В нижнюю часть внутренней трубы испарителя 10 монтируются диспергаторы пара различных конструкций. Острый пар генерируется в кипятильнике 17. Параметры

и расходы сред устанавливаются изменением режимов работы парогенератора 22, термостата 21, кипятильника 17, а также регулируются вентилями и кранами на соответствующих коммуникациях.

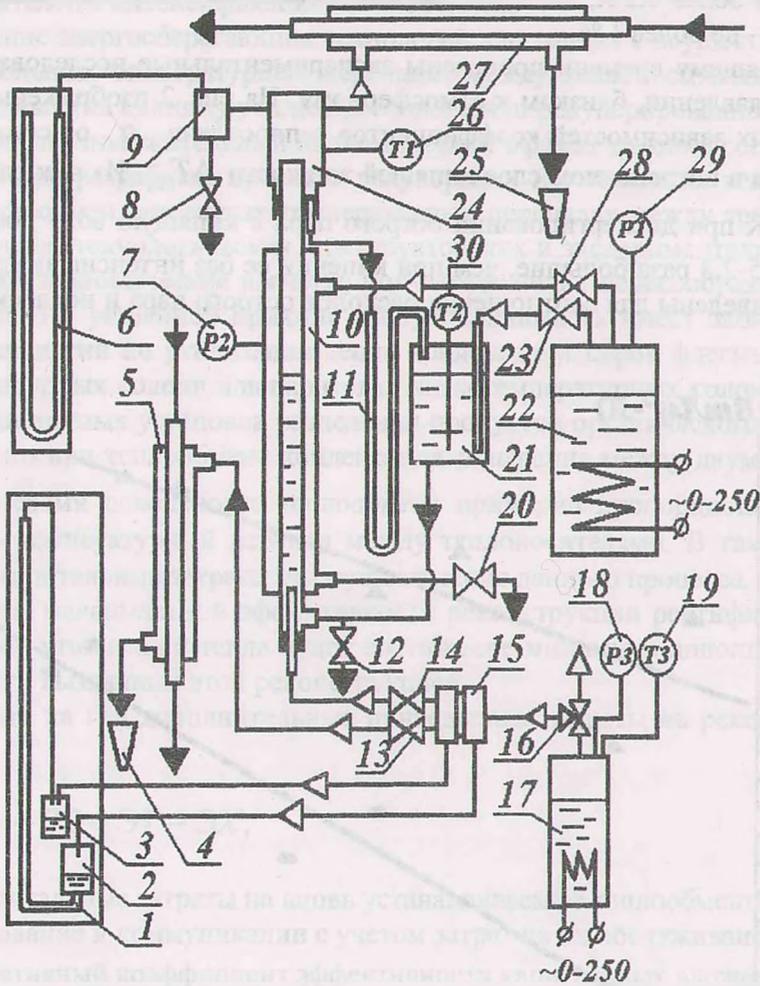


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1, 6 – дифференциальные манометры; 2, 3, 9 – сборники конденсата; 4, 25 – мерные сосуды; 5, 27 – конденсаторы; 7, 18, 29 – манометры; 8, 12-14, 16 – краны; 10 – испаритель; 11 – гидрозатвор; 15 – диафрагма; 17 – кипятильник; 19, 26, 30 – термометры; 20, 23, 28 – вентили; 21 – термостат; 22 – парогенератор; 24 – сепаратор

При проведении опытов измеряются и определяются: тепловой поток от греющего пара к кипящей жидкости; температуры кипения жидкости, недогрева ее, греющего и острого пара, стенки трубы в различных по высоте зонах; давление барометрическое, греющего, острого и полученного в результате кипения пара; расходы острого и получаемого при кипении жидкости пара. Тепловой поток рассчитывается по количеству конденсата испаряемой жидкости, измеренному объемным методом на выходе из конденсатора 27, а также по режимам ее кипения и свойствам. Измерение расхода острого пара осуществляется с помощью специальной диафрагмы 15, изготовленной с учетом рекомендаций справочника /5/. При интенсификации теплообмена диспергиро-

ванием острого пара расход испарившейся в испарителе 10 жидкости определяется как разность расходов конденсата из конденсатора 27 и острого пара.

Измерение температур ведется с помощью хромель-копелевых термопар с погрешностью не более 0,2 К, относительная погрешность измерения расходов не более 5 %, давлений – не более 1 %.

К настоящему времени проведены экспериментальные исследования для кипения воды при давлении, близком к атмосферному. На рис. 2 изображены графики экспериментальных зависимостей коэффициентов теплоотдачи α от среднего температурного напора в пограничном слое кипящей жидкости ΔT_{cm} . Из них следует, что при $\Delta T_{cm} = 1...3,5$ К при диспергировании острого пара в кипящую воду достигаются значения α в 1,5-2,3 раза большие, чем при кипении ее без интенсификации. Указанные результаты приведены для соотношения расходов острого пара и испаренной жидкости 0,20...0,30.

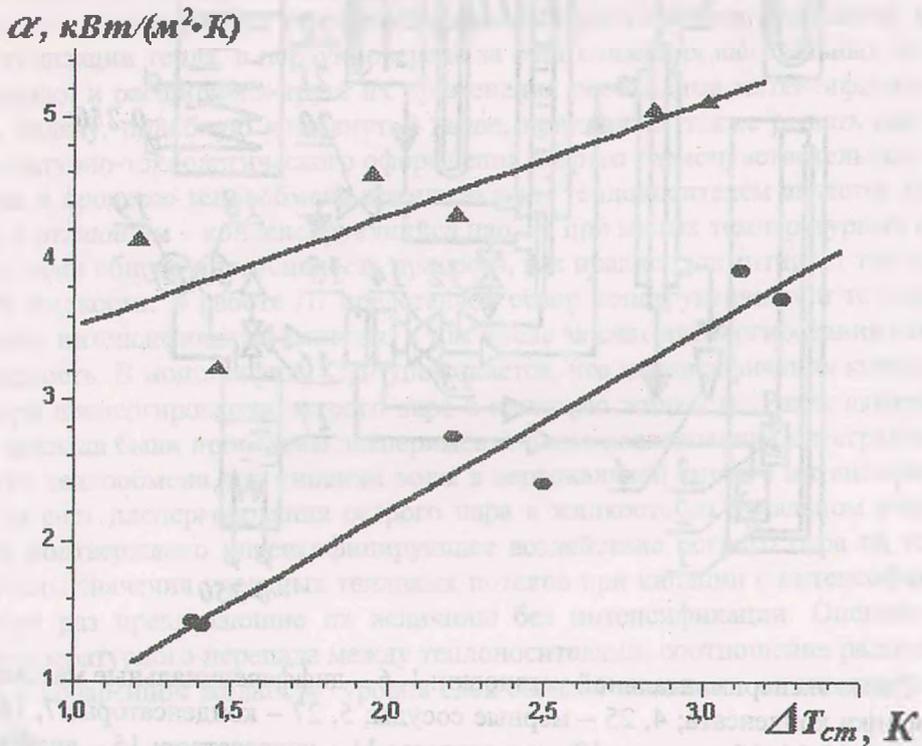


Рис. 2. Коэффициенты теплоотдачи при кипении без интенсификации (\bullet) и с интенсификацией (\blacktriangle)

При сравнении экспериментальных значений α для опытов без интенсификации теплообмена с рассчитанными по рекомендациям /6,7/ (удельный тепловой поток до $5 \text{ кВт}/\text{м}^2$) установлена удовлетворительная, с отклонением не более 30 %, их сходимость. Указанное сопоставление, а также анализ вновь полученных результатов с данными ранее проведенных исследований /4/ позволяют утверждать, что эксперимент поставлен достаточно корректно.

В дальнейшем на описанной установке будут определены при различных условиях кипения (переменных величинах температурных перепадов между теплоносителями, уровнях светлой жидкости в трубе, давлениях, без интенсификации и с интенсификацией)

фикацией острым паром) значения коэффициентов теплоотдачи и температурных напоров. Анализ экспериментальных данных позволит получить зависимости для расчета интенсивности кипения жидкости при диспергировании в нее острого пара, выдать рекомендации по оптимизации способов диспергирования пара, режимов работы и конструкций испарителей с интенсификацией теплообмена.

Внедрение энергосберегающих технологий, связанных с осуществлением теплообмена при больших температурных перепадах между теплоносителями, требует небольших удельных (на единицу утилизированного или рекуперированного тепла) капитальных вложений, положительный экономический эффект от них всегда достижим и гарантирован. При разработке проектов рекуперации и утилизации тепла, предусматривающих теплообмен при малых температурных перепадах между теплоносителями, наряду с решением технологических, конструкторских и экспериментальных задач следует выполнить экономические расчеты, подтверждающие целесообразность осуществления проекта. По указанной причине особую значимость имеет экономический аспект для мероприятий по утилизации тепла конденсации паров флегмы и дистиллята высокотемпературных колонн в испарителях низкотемпературных колонн многоколонных ректификационных установок разделения продуктов органического синтеза. Нами установлено, что при теплообмене конденсация–испарение между двумя органическими теплоносителями поверхность теплообмена примерно пропорциональна $\Delta T^{-2,55}/8$, где ΔT – температурный перепад между теплоносителями. В такой же мере от ΔT зависят и капитальные затраты на осуществление данного процесса.

Условием максимальной эффективности реконструкции ректификационных установок с целью утилизации тепла будет достижение минимума дополнительных приведенных затрат, вызванных этой реконструкцией.

В расчете на год дополнительные приведенные затраты на реконструкцию составят

$$\Delta П = \Delta КЗ \cdot E + 3Э - ЭТ - ЭХ, \quad (1)$$

где $\Delta КЗ$ – капитальные затраты на вновь устанавливаемые теплообменники, насосы и другое оборудование и коммуникации с учетом затрат на их обслуживание и ремонт, руб.; E – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, год⁻¹; $3Э$ – дополнительные затраты на электропривод насосов и т.д., руб./год; $ЭТ$ и $ЭХ$ – экономия, возникающая за счет снижения расходов греющего теплоносителя и хладагента соответственно, руб./год.

В оценочных расчетах удобнее оперировать величиной приведенных затрат, отнесенных к единице утилизированного тепла, $\Delta ПТ$, руб./ГДж. Приняв $E = 0,15$ год⁻¹, годовой ресурс работы ректификационной установки 8000 ч/год и в качестве хладагента в дефлегматоре высокотемпературной колонны воду, получим

$$\Delta ПТ = -ЦТ - 240ЦВ + (5,21 \cdot \Delta КЗ + 2,78 \cdot 10^5 \cdot N \cdot ЦЭ) / Q_y, \quad (2)$$

где $ЦТ$ – цена воды (хладагента), руб./м³; N – электрическая мощность, потребляемая насосами и другим оборудованием, устанавливаемым в результате реконструкции, кВт; $ЦЭ$ – цена электроэнергии, руб./(кВт·ч); Q_y – утилизированная тепловая мощность, Вт.

Для каждой конкретной установки с использованием зависимости (2) можно оценить критическое значение ΔT , ниже которого утилизация тепла будет нецелесообразна. При наличии интенсификации теплообмена критическое значение ΔT будет уменьшаться.

Расчеты, проведенные авторами для установок разделения продуктов окисления циклогексана в производстве капролактама, показали, что применение утилизации тепла по схеме конденсатор–испаритель без интенсификации кипения экономически целесообразно при $\Delta T > 22$ К. При меньших, но превышающих 10 К, перепадах температур для достижения экономического эффекта требуется интенсификация теплообмена. Таким образом, проведенный технико-экономический анализ свидетельствует об актуальности работ по исследованию интенсификации кипения, в том числе за счет диспергирования острого пара в кипящую жидкость.

Л и т е р а т у р а

1. Дрейцер Г.А. Современное состояние исследований интенсификации теплообмена в каналах и перспективы создания компактных теплообменных аппаратов // Тепломассообмен ММФ-96. Труды III Международного форума (20-24 мая 1996 г.). Минск: АНК «ИТМО им.А.В.Лыкова» АНБ, 1996. Т 10, ч. 1. С. 26-39.
2. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высшая школа, 1986. 448 с.
3. Таубман Е.И. Выпаривание. М.: Химия, 1982. 328 с.
4. Ершов А.И., Саевич Н.П., Калишук Д.Г. Влияние диспергирования пара в жидкость на интенсивность теплообмена при малых температурных перепадах между теплоносителями // Тепломассообмен ММФ-96. Труды III Минского международного форума (20-24 мая 1996 г.). Минск: АНК «ИТМО им.А.В.Лыкова» АНБ, 1996. Т 10, ч. 1. С. 54-59. Т.И. 111-115
5. Кремлевский П.П. Расходы и счетчики количества: Справочник. Л.: Машиностроение, 1989. 701 с.
6. Теория тепломассообмена / С.И.Исаев, И.А.Кожин, В.И.Кофанов и др. Под ред. А.И.Леонтьева. М.: Высш.школа, 1979. 495 с.
7. Справочник по теплообменникам: В 2 т. Т. 1 / Пер с англ., под ред. Б.С.Петухова, В.К.Шикова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 560 с.
8. Калишук Д.Г., Саевич Н.П., Коротков М.В. Технико-экономическая оценка утилизации низкопотенциального тепла // Энергоэффективность. 1999. № 9. С. 21.