

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В НАСАДКАХ РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ С ПЕРЕКРЕЩИВАЮЩИМИСЯ КАНАЛАМИ

Рябова И.Б., канд. техн. наук, доцент, Гапонова Е.А., канд. техн. наук, доцент,  
Горбунов К.А., канд. техн. наук, доцент

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков

*Экспериментально получены зависимости для определения интегрального коэффициента теплоотдачи и аэродинамического сопротивления орошаемых насадок регулярной структуры с перекрещивающимися каналами*

*The experimentally received dependence for the determination of the integral heat transfer coefficient and aerodynamic drag of humidified regular structure package with cross-section channels*

**Ключевые слова:** орошаемые насадки, косоугофрированные пластины, коэффициент теплоотдачи.

**Постановка проблемы.** Снижение потребления энергии, материалоемкости и ресурсосбережение в технологическом оборудовании различных отраслей промышленности является одной из важнейших задач современного машиностроения.

Так в современном массо- и теплообменном оборудовании различного назначения широко используются орошаемые насадки регулярной структуры, позволяющие создавать компактные аппараты. Одним из перспективных видов являются насадки из гидрофильных косоугофрированных пластин Френкеля [1]. Они представляют собой пакеты пластин, уложенных друг на друга таким образом, что образуют систему перекрещивающихся каналов переменного сечения. Это способствует возникновению вихревых течений в каналах и интенсификации процессов конвективного переноса. Известно, что насадки данного типа имеют коэффициент сужения фронтального сечения около 0,9, обладают весьма низким гидравлическим сопротивлением и характеризуются высокой степенью интенсификации процессов теплообмена.

Однако, данные по теплоаэродинамическим характеристикам таких насадок представлены в достаточно узком диапазоне геометрических параметров и массовых скоростей газа [2]. Анализ литературных источников, данных каталогов и проспектов ведущих зарубежных фирм показал, что в последнее время имеется тенденция к увеличению амплитуды и шага гофрирования. Вероятно, это обусловлено улучшением аэродинамической обстановки в каналах пластин в части увеличения равномерности распределения водяной пленки, снижения вероятности срыва капель водной поверхности и их выноса за пределы насадки, рациональной интенсификацией процессов теплообмена в каналах с большими эквивалентными диаметрами  $d_э$ . Это делает особо актуальным определение аэродинамического сопротивления и коэффициента теплоотдачи в насадках из косоугофрированных пластин в диапазоне изменения основных параметров насадок, учитывающем современные тенденции увеличения эквивалентного диаметра каналов насадок.

**Постановка задачи и ее решение.** Задачей экспериментального исследования насадок из пластин Френкеля является установление зависимостей между вторичными факторами (коэффициент теплоотдачи и аэродинамическое сопротивление) и первичными факторами (геометрические параметры: амплитуда и шаг гофры, угол скрещивания каналов, массовая скорость воздуха).

С целью выяснения реально достижимых уровней теплотехнических характеристик насадок из пластин Френкеля была проведена серия экспериментальных исследований образцов таких насадок с различными геометрическими параметрами амплитудой  $A$ , шагом гофрирования  $H$ , углом скрещивания  $\varphi$ , толщиной пластин  $\delta$ , массовой скоростью воздуха в каналах насадки  $w_p$ .

Для выявления влияния каждого из факторов и с целью минимизации количества исследуемых образцов насадок был применен метод греко-латинских квадратов [3]. От всех других методов планирования эксперимента этот метод отличается простотой и минимальным количеством данных при сохранении одинаковой точности обобщенной информации. При этом полагается, что обобщенная зависимость для вычисления определяемых величин представляется в виде произведения функций влияния отдельных факторов. В нашем случае толщина пластин изменялась незначительно и была исключена из рассмотрения в качестве первичного фактора. Таким образом для проведения испытаний

на трех уровнях геометрических параметров необходимо иметь всего лишь девять моделей опытных насадок.

Исследуемые образцы насадок были изготовлены из алюминиевой фольги толщиной от 0,25 до 0,6 мм. На поверхность алюминия с помощью метода химической обработки, разработанного в НТУ «ХПИ», было нанесено гидрофильное покрытие. При средней толщине поверхностного слоя около 80 мкм имеет место высокая гидрофильность и гигроскопичность рассматриваемого материала. Так 1 м<sup>2</sup> обработанной алюминиевой фольги адсорбирует около 0,080 кг воды, что составляет 20 % веса материала. Краевой угол смачивания равен 0°. Материал покрытия характеризуется также высокими капиллярными свойствами. В опытных образцах высота подъема жидкости по поверхности составляет 0,1 м, что является достаточно высоким показателем.

Испытания образцов насадок проводились на стенде, представляющем собой аэродинамическую трубу разомкнутого типа. Основным элементом стенда являлся рабочий участок сечением 0,25\*0,25 м, в который помещался исследуемый блок. Для обеспечения достаточно высоких психрометрических разностей температур воздуха в стенде имелся электронагреватель регулируемой мощности. С целью стабилизации скоростного поля перед исследуемым объектом на установке применялся способ просасывания воздуха вентилятором. Регулирование воздухопроизводительности вентилятора достигалось дроссельной заслонкой, установленной на его выхлопном коллекторе.

Измерение расхода воздуха и аэродинамического сопротивления производилось стандартными манометрами типа ММН-250 посредством изготовленного в соответствии с рекомендациями ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского измерительного коллектора и точек отбора статического давления. Для устранения температурных расслоений воздушного потока по сечению воздуховода до и после испытываемой модели применялись смесители лопаточного типа с последующей установкой за ними успокоителей крупномасштабной турбулизации потока и выравнивающих сеток. Измерение температур воздуха на входе в стенд, а также перед моделью и на выходе из нее по сухому и мокрому термометрам производилось на стабилизированных участках лабораторными термометрами с ценой деления 0,1 °С. Батистовые чехлы на мокрых термометрах смачивались дистиллированной водой и периодически заменялись чистыми.

Для проверки выбранной методики и метрологического обеспечения стенда были проведены испытания фрагмента насадки шведской фирмы «Munters», изготавливаемой из специальной бумаги, пропитанной фенолформальдегидными смолами, для которой известны ее теплоаэродинамические характеристики [4]. Тестовая насадка имела следующую геометрию пластин: амплитуду гофрирования  $A = 6,5$  мм, шаг  $H = 15,0$  мм, угол скрещивания каналов  $\varphi = 30+60=90^\circ$ , коэффициент сужения фронтального сечения  $k_c = 0,949$  и глубину  $l = 0,1$  м.

Сравнение опубликованных данных и результатов испытания насадки показало достаточно высокую точность совпадения. Так, например, при скорости во фронтальном сечении равной 2,4 м/с разница в  $NTU$  составляет 8 %, а по аэродинамическому сопротивлению  $\Delta p = 3,7$  %, при скорости 1,85 м/с разница в  $NTU$  составляет 3 %, по  $\Delta p = 9,4$  %.

Для изучения теплоаэродинамических характеристик были выбраны насадки, геометрические параметры которых лежат в следующем диапазоне: амплитуды гофрирования  $A = 5\div 9$  мм, шага гофрирования  $H = 9\div 21$  мм, угла скрещивания  $\varphi = 30^\circ\div 90^\circ$ , массовой скорости во фронтальном сечении  $v\rho = 2\div 6$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

В соответствии с методикой рационального планирования эксперимента [3] каждый из определяющих геометрических факторов должен иметь три уровня изменения, то есть:  $A = 5$  мм, 7 мм, 9 мм;  $H = 9$  мм, 15 мм, 21 мм;  $\varphi = 90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ . В этом случае при девяти моделях насадочных блоков, каждый из них должен иметь сочетание геометрических параметров, представленное в нижеприведенном греко-латинском квадрате (табл. 1). В вертикальных столбцах таблицы приведены значения амплитуды гофрирования исследуемых образцов, мм.

Таблица 1 – Параметры исследуемых образцов насадок

Угол скрещивания каналов, °	Шаг гофрирования, мм		
	9	15	21
30	5	7	9
60	7	9	5
90	9	5	7

Значения средней скорости, выбранные при проведении исследований, составляли 1,5 м/с, 2,5 м/с, 3,5 м/с.

Интегральные значения коэффициентов теплоотдачи определялись исходя из того, что тепломассообмен при движении воздуха над смоченной поверхностью в установившемся адиабатном режиме (при постоянных параметрах входящего воздуха) протекает при постоянной температуре по мокрому термометру.

В этом случае уравнение, описывающее изменение температуры воздуха по длине канала имеет вид:

$$\frac{dt_e}{dx} = \frac{\alpha \cdot b}{c_p \cdot G_e} (t_m - t_e).$$

Интегрируя это выражение по длине, получим:

$$E = 1 - e^{-\alpha F / (c_p G_e)} = 1 - e^{-NTU},$$

откуда интегральный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = -\ln(1 - E) \frac{c_p G_e}{F} = NTU \frac{c_p G_e}{F}; \quad (1)$$

$$E = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{t_{c1} - t_m},$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности тепломассообмена, кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $E$  – коэффициент адиабатной эффективности;  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К);  $G_e$  – массовый расход воздуха, кг/с;  $NTU$  – число единиц переноса;  $F$  – поверхность тепломассообмена, м<sup>2</sup>,  $t_{c1}, t_{c2}, t_m$  – температуры воздуха по сухому термометру на входе и на выходе из насадки и температура по мокрому термометру соответственно, °С.

Таким образом, изменяя в установившемся режиме параметры воздуха на входе и на выходе из насадки, можно по (1) определять зависимости коэффициентов внешней теплоотдачи от скорости для различных типов таких насадок.

В результате обработки экспериментальных данных было проанализировано влияние каждого из факторов и получены обобщенные зависимости для числа единиц переноса, интегрального коэффициента теплоотдачи и аэродинамического сопротивления насадок.

Число единиц переноса:

$$NTU = 659 \cdot l \cdot (\nu\rho)^{-0.355} \cdot A^{-1.02} \cdot H^{-0.76} \cdot \varphi^{0.62}. \quad (2)$$

Указанная зависимость справедлива в следующих диапазонах изменения параметров  $5 \leq A \leq 9$  мм;  $9 \leq H \leq 21$  мм;  $30 \leq \varphi \leq 90^\circ$ ,  $1.8 \leq \nu\rho \leq 4.2$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

Для проведения расчетов при сравнении эффективности различных типов насадок, а также расчетов, по определению количества требуемого материала пластин, оказывается удобным теплотехнические характеристики насадок представить в традиционном виде

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_s}{\lambda},$$

где интегральный коэффициент теплоотдачи определяется по следующему выражению:

$$\alpha = 81,97 (\nu)^{0.64} \cdot A^{-0.45} \cdot H^{-0.12} \cdot \varphi^{0.59}. \quad (3)$$

Величину эквивалентного диаметра  $d_s$  можно определить по формуле:

$$d_s = \frac{4}{q} - 2\delta,$$

где  $q$  – удельная поверхность тепломассообмена насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>, вычисляемая по эмпирической формуле:

$$q = \frac{F_{mo}}{F_{\phi p} \cdot L} = 4581 \cdot A^{-0.49} \cdot H^{-0.53}.$$

Величина аэродинамического сопротивления насадок из косоугофрированных пластин с различными геометрическими характеристиками в исследуемом диапазоне изменения параметров имеет вид:

$$\Delta p = 383 \cdot l \cdot (\nu\rho)^{1.78} \cdot A^{-0.9} \cdot H^{-0.25} \cdot \varphi^{1.38}. \quad (4)$$

Сравнение величин  $NTU$  и  $\Delta p$ , полученных в ходе экспериментальных исследований и рассчитанных по зависимостям (2) и (4), для массовой скорости  $\nu\rho = 3,0$  кг/(м<sup>2</sup>·с) не превышает для

$NTU - 7,4\%$ , для  $\Delta p - 15,3\%$ , что говорит о хорошем качественном и удовлетворительном количественном согласовании.

**Выводы.** В результате экспериментальных исследований получены обобщенные зависимости, позволяющие прогнозировать значения интегрального коэффициента теплоотдачи и аэродинамического сопротивления в компактных теплообменниках аппаратах, изготовленных на базе орошаемых пластин Френкеля для диапазона изменения геометрических параметров гофрирования (амплитуды  $5 \leq A \leq 9$  мм; шага  $9 \leq H \leq 21$  мм; угла скрещивания каналов  $30 \leq \varphi \leq 90^\circ$ ) и массовой скорости потока воздуха  $1.8 \leq v_p \leq 4.2$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

Данные результаты могут быть использованы при определении оптимальных параметров насадок регулярной структуры на базе кософрированных пластин и для проектирования компактных теплообменников устройств (для косвенного испарительного охлаждения воздуха с целью энергосбережения, для тепловлажностной обработки воздуха в системах кондиционирования, для повышения эффективности работы установок различного назначения).

#### Литература

1. Крум Д., Робертс Б. Кондиционирование воздуха и вентиляция зданий.- М.: Стройиздат, 1980. – 399 с.
2. Бялый. Б.И., Набиулин Ф.А. Интенсификация процессов теплообмена в каналах пластин Френкеля // Кондиционеростроение. – Харьков, 1976, вып. 5, С. 7–11.
3. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972, – 381 с.
4. Современное отечественное и зарубежное оборудование для тепловлажностной обработки воздуха в центральных кондиционерах. Серия «Кондиционеры, калориферы и вентиляторы». Обзорная информация. – М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1978. – 58 с.

УДК 658.28:665.63:338

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ РЕКОМПРЕССИИ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕПЛОВОЙ ИНТЕГРАЦИИ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН

Быканов С.Н., канд. техн. наук, доцент, Перевертайленко А.Ю., ст.научн.сотр.,  
Гарев А.О., ассистент, Горбунов К.А., канд.техн.наук, доцент, Рябова И.Б. канд.техн.наук, доцент,  
Гапонова Е.А., канд. техн. наук, доцент, Кармазина Ю.А. студент  
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков

*Рассмотрены вопросы применения механической рекомпрессии при комплексной тепловой интеграции ректификационных колонн и определены границы экономической целесообразности ее применения.*

*The problems of mechanical vapor compression for complex heat integration of distillation columns use and some related economic factors are discussed.*

**Ключевые слова:** ректификация, тепловая интеграция, утилиты, механическая рекомпрессия.

#### Постановка и актуальность задачи

Ректификационные колонны являются одним из наиболее энергоемких видов технологического оборудования. Как отмечено в [1–3], в большинстве ректификационных установок полностью отсутствует рекуперация тепла между горячими и холодными потоками, поэтому для нагрева сырья, поступающего на ректификацию, используются горячие утилиты (водяной пар), а для охлаждения дистиллята и кубового остатка используются холодные утилиты (охлаждающая вода). Тепловая интеграция потоков узла ректификации рассмотрена в ряде работ, например, в [4,5]. Отмечено, что при этом достигается существенная экономия утилит. Большая величина экономии тепловой энергии достигается при комплексной тепловой интеграции ректификационных колонн.

Основные принципы комплексной тепловой интеграции ректификационных колонн изложены в [3]. Для «внутренней» интеграции используется теплонасосная технология, предусматривающая механическую рекомпрессию паров низкокипящего компонента. Подобная технология отмечена как