

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЙ ТЕПЛОМАССОБМЕННОЙ НАСАДКИ

Степыкин А.В.¹, Сидягин А.А.¹

¹ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Дзержинский политехнический институт, Дзержинск, Россия (606001, г. Дзержинск, ул. Гайдара, 49), e-mail: cngh@yandex.ru

Приведено описание новой блочно-модульной конструкции контактного устройства, отмечены особенности данной конструкции. Стоит отметить, что предложенное контактное устройство обладает сложной структурой, что и является основной его особенностью. В статье поставлена задача определить предельные нагрузки по фазам, а также выявить основные гидродинамические режимы работы насадки и их границы. Для этого использовались специально разработанные лабораторные стенды с колоннами 200 и 132 мм. Подтверждено, что для разработанного аппарата предельные нагрузки могут определяться по уравнению Бейна-Хоугена. Для уравнения определены коэффициенты. Кроме этого, выявлены два рабочих режима устройства. Это пленочный и режим подвисяния. Скорость газа, соответствующую режиму подвисяния предложено определять как долю от скорости захлебывания. Коэффициенты в уравнении Бейна-Хоугена являются зависимыми от количества теплообменных модулей и сетчатой насадки в блоке. То же самое имеет место при определении границы гидродинамических режимов.

Ключевые слова: теплонапряженные процессы, контактные устройства, массообмен, теплообмен, абсорбция, ректификация.

EXPERIMENTAL STUDY OF HYDRODYNAMIC OPERATING MODES OF THE BLOCK AND MODULAR HEAT-MASS-EXCHANGED CONTACT DEVICE

Stepukin A.V., Sidiyagin A.A.

Dzerginsky Polytechnical institute (branch) Nizhny Novgorod state technical university, Russia, e-mail cngh@yandex.ru

The description of a new block and modular design of the contact device is provided. Features of this design are noted. It should be noted that the offered contact device possesses complex structure, it is main feature. In the paper the task to determine maximum loads by phases, and also to reveal the main hydrodynamic operating modes of device and their border is set. Specially designed laboratory stands with columns of 200 mm and 132 mm were for this purpose used. It is confirmed that for the developed device maximum loads can be determined by Beyna-Hougen's equation. For the equation coefficients are defined. Two operating modes of the device are revealed. It is film regime and regime of suspension. Gas speed, corresponding to the regime of suspension define, how a pat from speed of flooding. Coefficients in Beyna-Hougen's equation are dependent on number of heat-exchange modules and a grid elements in the block. The same takes place when determining border of the hydrodynamic regimes.

Keywords: highly thermal processes, contact devices, mass exchange, heat exchange, absorption, rectification.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности работы промышленных колонных аппаратов является оптимизация температурных условий. Это направление становится особенно актуальным при протекании теплонапряженных массообменных процессов, характеризующихся высокими тепловыми эффектами. В целях оптимизации температурных условий применяют специальные контактные устройства с внедренными теплообменными элементами. Наиболее перспективными видами таких устройств являются насадочные, применяемые для широкого спектра технологических процессов [3].

В качестве такого устройства была разработана блочно-модульная насадка с внедренными пластинчатыми теплообменными элементами [1]. Схема одного блока насадки,

установленного в колонну, приведена на рис. 1.

Насадочный блок состоит из отдельных теплообменных пластинчатых элементов – модулей 2, собираемых в жесткую конструкцию на распределительном коллекторе 4 устройства. Между модулями устанавливаются листы из гофрированной сетки, имеющие специальную структуру гофров. Стенки теплообменного модуля также выполнены гофрированными.

Насадка установлена в колонну в виде блоков, коллекторы которых могут соединяться между собой или иметь вывод штуцеров наружу. Взаимодействие фаз происходит на наружной поверхности модулей и гофрированных сетчатых элементов. Во внутреннюю полость пластинчатых модулей подается теплоноситель.

Важными показателями работы контактного устройства являются значения предельно допустимых нагрузок и границы наиболее эффективных режимов работы аппарата, определению которых и посвящена данная статья.

Насадочные колонны могут работать в самых различных гидродинамических режимах, определяемых расходами по газу и жидкости. Для большинства насадок, в том числе и для предлагаемой, с увеличением скорости газа повышается эффективность массообмена.

Экспериментальные исследования производились на лабораторных установках с колоннами диаметром 132 и 200 мм. Для визуального наблюдения за работой насадки корпуса колонн выполнялись прозрачными (из органического стекла). Эксперимент проводился на системе «вода - воздух». При проведении исследований применялись устройства нескольких вариантов конфигураций, параметры которых приведены в табл. 1.

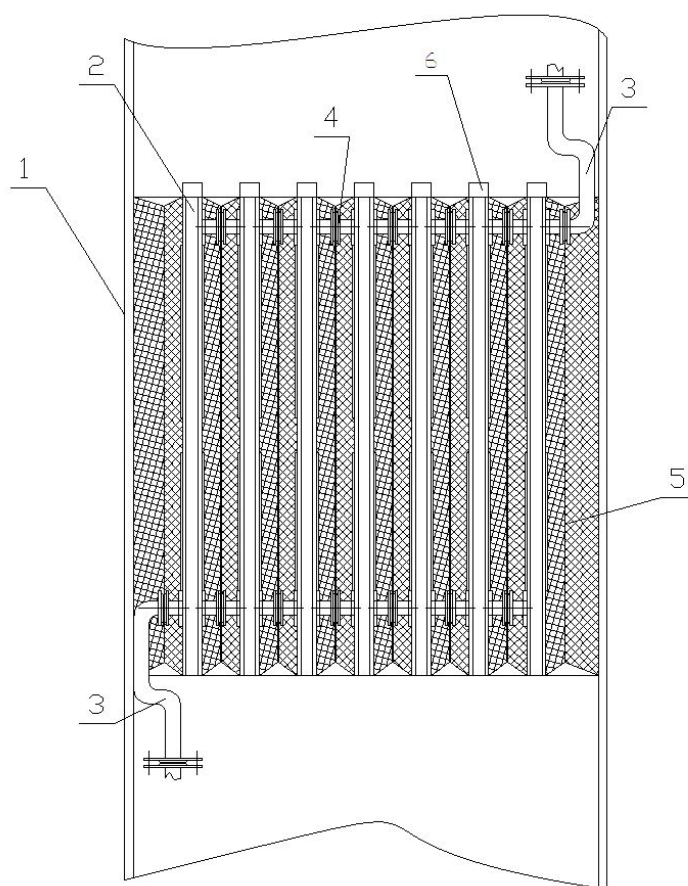


Рис. 1. Тепломассообменный блок:

1 – корпус аппарата; 2 – пластинчатый теплообменный модуль; 3 – патрубки ввода и вывода теплоносителя; 4 – коллектор теплообменный; 5 – сетчатый контактный элемент; 6 – распределитель жидкости.

Таблица 1

Параметры исследуемых контактных устройств в колоннах

Модификация блока	Количество теплообменных модулей	Поверхность теплообмена м ² /м ³	Поверхность массообмена м ² /м ³	Объемная доля пластинчатых модулей
1	4	62	240	0.45
2	3	44	220	0.32
3	2	28	288	0.2
4	-	0	325	0

В ходе экспериментов измерялось гидравлическое сопротивление блока насадки при различных нагрузках по жидкости и газу. В результате были получены зависимости вида $\Delta P = f(W)$, на рис. 2 показаны графические зависимости для модификации насадки 1 (характеристики в табл. 1), при нескольких плотностях орошения. Аналогичные зависимости были получены для других модификаций.

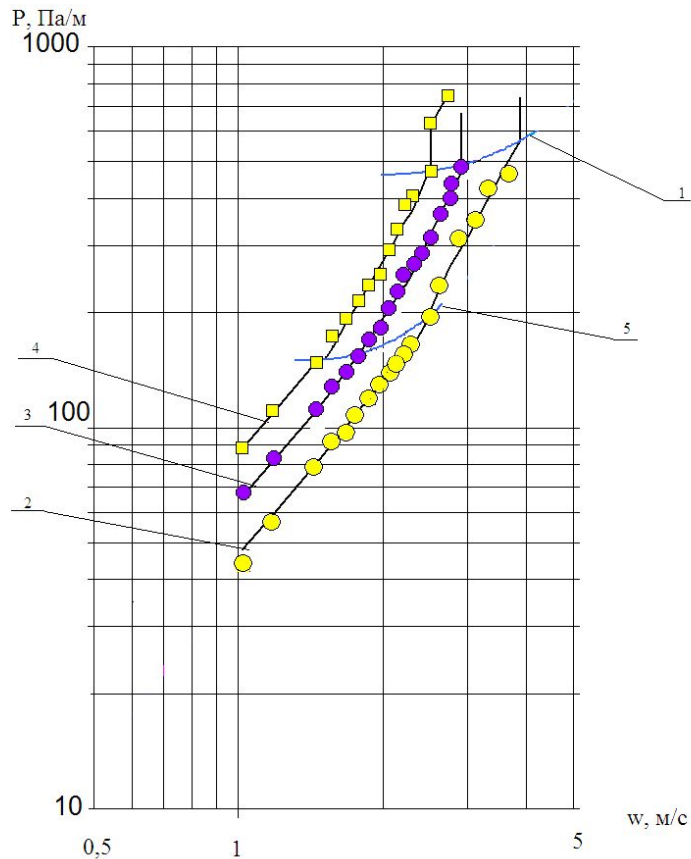


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления колонны от фиктивной скорости газа при модификации блока 1:

1 – граница области подвисяния и захлебывания; орошаемая насадка при плотности орошения $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
 2 – 0,0032, 3 – 0,0081; 4 – 0,0130; 5 – граница области подвисяния и ламинарного режима.

При анализе этих зависимостей были определены моменты начала захлебывания и выявлены два принципиально различных режима до области захлебывания: пленочный режим и режим подвисяния. Переход от режима к режиму фиксировался как визуально, так и по изменению характера зависимости гидравлического сопротивления от скорости газа.

Визуально пленочный режим характеризуется малым волнообразованием на поверхности пленки, а режим подвисяния – значительным волнообразованием, увеличением толщины стекающей пленки жидкости.

Для оценки предельных нагрузок были построены зависимости вида

$$Y = A - BX, \quad (1)$$

где X, Y – комплексы, которые определяются

$$Y = \lg \left(\frac{\omega_{\text{захл}}^2}{g} \cdot \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{в}}} \right)^{0,16} \right), \quad (2)$$

$$X = \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,125}, \quad (3)$$

где A , B – экспериментально определяемые коэффициенты, зависящие от типа насадки и условий протекания процесса;

$\rho_{\hat{A}}$, $\mu_{\hat{A}}$, $\rho_{\hat{E}}$, $\mu_{\hat{E}}$ – плотности (кг/м^3) и вязкости газа ($\text{Па}\cdot\text{с}$) и жидкости, соответственно;

μ_B – вязкость воды при данной температуре ($\text{Па}\cdot\text{с}$);

L , G – массовые расходы жидкости и газа соответственно (кг/с);

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что коэффициент A имеет значения в пределах 0,637–0,78, коэффициент B – значения в пределах 1,22–1,64. Для определения конкретных значений коэффициентов при разных конфигурациях блока предлагается использовать уравнения (4), (5). A и B определяются в зависимости от объемной доли теплообменных модулей x_{Π} .

$$A = A_{\Pi} \cdot x_{\Pi} + A_C(1 - x_{\Pi}), \quad (4)$$

$$B = B_{\Pi} \cdot x_{\Pi} + B_C(1 - x_{\Pi}), \quad (5)$$

где A_{Π} , B_{Π} , A_C , B_C – коэффициенты влияния, учитывающие долю теплообменных модулей и сетчатой насадки.

Значения коэффициентов влияния приведены в табл. 2. Используя данные значения и зависимости (3) – (4) определяются коэффициенты A , B для любой модификации блочно-модульного устройства.

Таблица 2

Значения коэффициентов для определения скорости захлебывания

Наименование	Гофрированные сетчатые элементы		Пластинчатые теплообменные модули	
	A_C	B_C	A_{Π}	B_{Π}
Значение	0,637	1,22	0,955	2,17

Экспериментальные и расчетные данные, построенные в координатах X, Y , приведены на рис. 3. При этом наблюдается хорошая сходимость практических значений и расчетных кривых.

Максимальной скоростью газа является скорость захлебывания, при достижении которой жидкость накапливается в слое насадки и газ начинает барботировать через жидкость, при этом насадка лишается своего основного преимущества – низкого гидравлического сопротивления. Поэтому основной рабочий диапазон аппарата лежит ниже точки захлебывания. Фиктивную скорость (скорость, отнесенную ко всему сечению колонны) при захлебывании обычно определяют из соотношения [2; 5]

$$\lg \left(\frac{\omega_{\text{захл}}^2}{g} \cdot \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{жс}}} \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{в}}} \right)^{0,16} \right) = A - B \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{жс}}} \right)^{0,125} \quad (6)$$

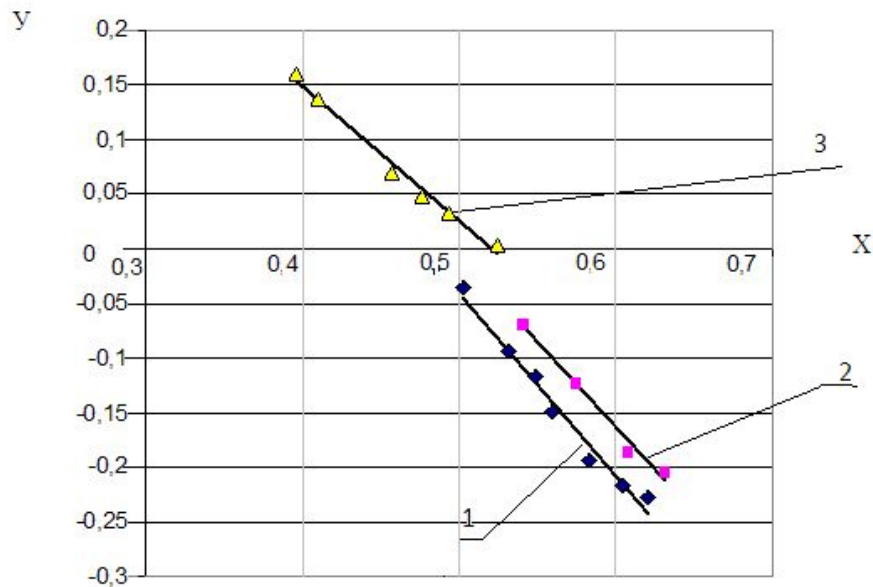


Рис. 3. Зависимости скоростей захлебывания в координатах X,Y:

1 – модификация № 1; 2 – модификация № 2; 3 – модификация № 4.

Кроме скорости начала захлебывания важным показателем является скорость перехода к режиму подвисяния. В ходе экспериментов отмечено, что скорость подвисяния зависит от конфигурации устройства. Это связано с различным растеканием жидкости по поверхности входящих в насадку элементов [4], а следовательно, различным взаимодействием газовой и жидкой фазы. Исследования показали, что наступление подвисяния для пластинчатых модулей происходит значительно позже, нежели для сетчатых элементов, так как пленка на поверхности пластины гораздо толще и тяжелее поддается волнообразованию. Скорость подвисяния в блочно-модульной насадке предлагается определять как долю от скорости захлебывания по формуле:

$$w_{\text{подв}} = C \cdot w_{\text{захл}} \quad (7)$$

где C – коэффициент перехода, который предлагается определять по формуле

$$C_{\Sigma} = C_{\Pi} \cdot (x_{\Pi}) + C_C (1 - x_{\Pi}) \quad (8)$$

где C_C , C_{Π} – коэффициенты для сетчатых и пластинчатых элементов;

x_{Π} – объемная доля пластинчатых теплообменных модулей в блоке.

Обработка экспериментальных данных показала, что $C_C=0.45$, $C_{\Pi}=0.786$.

Проводились исследования и на других модификациях блока (табл. 1), в ходе них зависимость перехода к режиму подвисяния также была подтверждена.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов были определены границы

гидродинамических режимов и предложены зависимости для их определения. Для расчетных зависимостей определены коэффициенты. Отмечено, что для данного контактного устройства основными рабочими режимами будут являться пленочный режим и режим подвисяния. Предложенный подход показал хорошую сходимость экспериментальных и расчетных данных для предложенного блочно-модульного контактного устройства.

Список литературы

1. А. с. Ru 141 498, кл В 01 D 3/28, Тепломассообменное устройство, Бюл № 16, 2014.
2. Сидягин А.А. Колонные аппараты для массообменных процессов. – Н. Новгород : Изд-во НГТУ, 2009. – 115 с.
3. Степыкин А.В., Сидягин А.А. Контактные устройства для проведения теплонапряженных массообменных процессов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. - № 5. – С. 18–21.
4. Степыкин А.В., Сидягин А.А. Математическое моделирование растекания жидкости по поверхности блочной тепло-массообменной насадки : материалы XXVI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – 2013. - 26, секция 11, том 7. – С. 186.
5. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М. : Химия, 1975. – 767 с.

Рецензенты:

Ким П.П., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», Дзержинский политехнический институт НГТУ им. Р.Е. Алексева, г.Дзержинск.
Иванов С.П., д.т.н., доцент, зав. кафедрой ОНХЗ, филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет в г. Стерлитамаке», г.Стерлитамак.