

УДК 66.021.1:66.069.833

К. А. Алексеев, А. Г. Мухаметзянова

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СТАТИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ, ЗАПОЛНЕННОГО КОЛЬЦАМИ РАШИГА**

Ключевые слова: статический смеситель, кольца Рашига, структура потоков, перепад давления, коэффициент гидравлического сопротивления.

В статье приведены результаты экспериментального исследования гидродинамических характеристик статического смесителя с насадочным слоем из керамических колец Рашига 25x25x3 полученных для жидкой среды. Дано описание конструкции экспериментальной установки, методики проведения эксперимента, моделей гидродинамической структуры потоков, использованных в работе. Получены эмпирические зависимости параметров этих моделей и перепада давления от скорости течения жидкости и числа Рейнольдса.

Keywords: static mixer, Raschig rings, flow structure, pressure drop hydraulic resistance coefficient.

The article presents the results of an experimental study of the hydrodynamic characteristics of a static mixer with a packed bed of ceramic Raschig rings 25x25x3 obtained for liquid medium. Described the design of the experimental setup, experimental technique, model hydrodynamic flow patterns that were used in the work. Obtained the empirical dependence of the parameters of these models and the differential pressure on the rate of fluid flow and Reynolds number.

Введение

В большинстве технологических процессов в качестве контактных устройств используется слой насадочных элементов различных видов и размеров [1-5]. В нефтяной, химической и других областях промышленности широкое распространение получили кольца Рашига. Они просты в изготовлении и обладают высокой стойкостью к химическому воздействию жидкости и газа, но имеют высокое гидравлическое сопротивление. Кольца Рашига достаточно хорошо изучены, однако экспериментальные данные, которые можно найти в литературе, получены для систем газ-жидкость в насадочных колоннах. Поэтому целью данной статьи было экспериментальное изучение гидродинамических характеристик статического смесителя с насадочным слоем из керамических колец Рашига для жидкой среды.

Экспериментальная часть

Наиболее полную информацию о гидродинамической структуре потоков в аппарате можно получить из поля скорости. Однако одновременное измерение величины вектора скорости во множестве точек представляет собой значительную техническую сложность, которая требует применения дорогостоящих комплексов измерительного оборудования. Поэтому для экспериментального исследования часто используется так называемый метод “меченых объемов”, основанный на изучении функции распределения времени пребывания элементов потока в аппарате (кривой отклика, С-кривой). Для этого в основной поток производится импульсный ввод инертного индикатора с последующей регистрацией кривой отклика на выходе из аппарата.

Другой важной характеристикой, которая связана с эффективностью работы статических смесителей и характеризует затраты энергии на проведение технологического процесса является величина падения давления.

Исследование гидродинамических характеристик проводилось на экспериментальной установке, подробное описание которой можно найти в [1]. Её принципиальная схема представлена на рис. 1. Перед началом экспериментов установка была модернизирована: разработана и установлена система впрыска индикатора; собрана и смонтирована система регистрации кривой отклика.

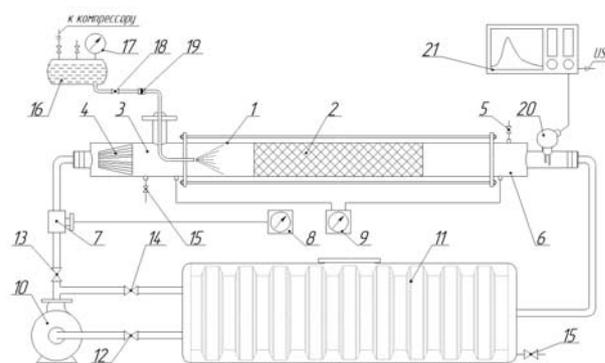


Рис. 1 - Принципиальная схема установки: 1 – участок наблюдения (оргстекло); 2 – слой насадки; 3 – узел подвода компонентов; 4 – распределитель потока; 5 – пробоотборник; 6 – узел вывода смеси; 7 – первичный преобразователь расхода; 8 – измерительный преобразователь расхода; 9 – датчик дифференциального давления; 10 – насос; 11 – бак; 12, 13, 14, 18 – вентили; 15 – слив; 16 – ёмкость с индикатором; 17 – манометр; 19 – жиклёр; 20 – кондуктометрический датчик; 21 – цифровой осциллограф

В ходе эксперимента с помощью вентиля 13 задавался расход воды в статическом смесителе, заполненном беспорядочно уложенными (навалом) керамическими кольцами Рашига. Характеристики насадки представлены в табл. 1, высота насадочного слоя во всех экспериментах равнялась 0,5 м. После выхода установки на стационарный режим работы, открытием вентиля 17 производился впрыск индикатора (10%-ного водного раствора NaCl) из ёмкости 16 в рабочую часть смесителя, время впрыска составляло менее 1 секунды. Для быстрого и точного ввода индикатора в аппарат, в ёмкости 16 с помощью воздушного компрессора создавалось избыточное давление равное 0,5 МПа. Количество индикатора, подаваемого за одно открытие, контролировалось с помощью установленного в трубопроводе жиклера с диаметром проходного отверстия 2 мм. Расстояние между точкой ввода индикатора и насадочным слоем было выбрано таким образом, чтобы обеспечить выравнивание концентрации по всему сечению аппарата.

Таблица 1 - Характеристики насадки

Насадка	Размеры элемента, мм	Удельная поверхность, м ² /м ³	Свободный объем, м ³ /м ³	Эквивалентный диаметр, м	Вес 1 м ³ насадки, кг
Керамические кольца Рашига	25x25x3	190-200	0,68-0,74	0,015	530-670

Кривую отклика регистрировали с помощью электропроводной ячейки, установленной на выходе из смесителя. Ячейка состояла из двух штывревых электродов диаметром 4 мм, изготовленных из электрополированной нержавеющей стали. Изменение электропроводности воды фиксировали с помощью цифрового осциллографа Owon PDS7102T с полосой пропускания 100 МГц. За один эксперимент осциллограф сохранял 6000 значений кривой отклика в заданном диапазоне времени. Полученные данные по интерфейсу USB передавались в компьютер, где сохранялись в формате MS Excel. Корректировку положения нуля производили перед каждым экспериментом путем подстройки осциллографа.

Величину падения давления регистрировали при различных скоростях течения в аппарате с помощью датчика дифференциального давления, 9.

В результате экспериментов были получены кривые отклика, а также значения перепада давления при различных скоростях течения жидкости в смесителе.

Обработка результатов эксперимента

Для описания гидродинамической структуры потоков разработано большое количество теоретических моделей (диффузионная, ячеечная, рециркуляционная, комбинированная и т.д.) [3-6]. Наибольшее распространение, вследствие достаточной простоты и сравнительно небольшим требованиям к проведению эксперимента, получили

диффузионная и различные модификации ячеечной модели.

Параметр диффузионной модели – критерий Пекле (Pe_L) находили путем численного решения нелинейного уравнения, отражающего известное соотношение между критерием Pe_L и дисперсией распределения времени пребывания σ^2 :

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{2}{Pe_L^2} (Pe_L - 1 + \exp(-Pe_L)) \quad (1)$$

Для нахождения параметра ячеечной модели – числа ячеек (m) использовалось соотношение:

$$m = \frac{1}{\sigma_{\theta}^2} \quad (2)$$

Дисперсию функции распределения времени пребывания элементов потока в аппарате рассчитывали путем обработки полученных экспериментально точек кривой отклика:

$$\sigma_{\theta}^2 = \Delta\theta \cdot \left(\sum_{i=1}^n (\theta_i - 1)^2 \cdot f_i^* \right), \quad (3)$$

где $\theta_i = t_i / t_{cp}$ и $\Delta\theta = \Delta t / t_{cp}$ – безразмерные

время пребывания и шаг по времени; $f_i^* = t_{cp} \cdot f_i$ – безразмерная функция распределения; t_{cp} – среднее время пребывания, которое определялось в зависимости от расхода жидкости в статическом смесителе по формуле:

$$t_{cp} = \frac{\bar{V}}{V}, \quad (4)$$

где \bar{V} – объемный расход жидкости, м³/с; V – объем аппарата, м³.

При решении практических задач часто используют не параметры той или иной модели, а коэффициент продольного (обратного) перемешивания, значение которого зависит от числа Pe_L :

$$D_L = \frac{w_{cp} \cdot L}{Pe_L}, \quad (5)$$

где w_{cp} – средняя скорость течения, м/с; L – длина аппарата, м.

Проверка адекватности проводилась путем сравнения экспериментальной и модельных функций распределения $f^*(\theta)$ [4], которые рассчитывались по найденным параметрам моделей:

- для диффузионной модели

$$f^*(\theta) = \sqrt{\frac{Pe_L}{4\pi\theta}} \cdot \exp\left(-\frac{Pe_L}{4} \cdot \frac{(\theta-1)^2}{\theta}\right); \quad (6)$$

- для ячеечной модели

$$f^*(\theta) = \frac{m^m}{(m-1)!} \cdot \theta^{m-1} \cdot \exp(-m \cdot \theta). \quad (7)$$

Для того чтобы избежать рутинных действий и максимально упростить процесс обработки полученного в результате экспериментов массива данных была написана специальная программа на языке программирования Visual Basic (VBA)

интегрированного в среду MS Excel. Её интерфейс представлен на рис. 2. В результате для каждой полученной кривой отклика рассчитаны: число ячеек, число Пекле, средние расхождения экспериментальной кривой от диффузионной и ячеечной модели, коэффициент продольного перемешивания.

Гидравлическое сопротивление слоя насадки обычно выражают с помощью коэффициента гидравлического сопротивления ξ , который зависит от формы насадки и характера движения среды. Его значение для насадочных аппаратов можно найти по формуле:

$$\Delta P = \xi \frac{H}{d_3} \frac{\rho w_{cp}^2}{2}, \quad (8)$$

где H – высота слоя насадки, м; d_3 – эквивалентный диаметр каналов насадки, м.

$$\xi = \frac{C_t}{Re^n}, \quad (9)$$

где C_t и n – эмпирические константы; Re – число Рейнольдса:

$$Re = \frac{w_{cp} d_3}{\nu_{ж}}, \quad (10)$$

где $\nu_{ж}$ – кинематическая вязкость жидкости, m^2/c .

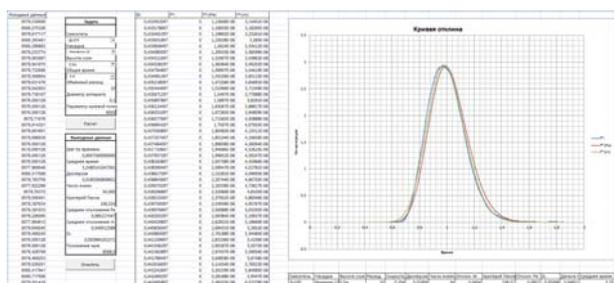


Рис. 2 - Интерфейс программы для обработки экспериментальных кривых отклика

Результаты исследования

Результаты экспериментов по изучению гидравлических характеристик в статическом смесителе представлены в табл. 2 и на рис. 3-4. Эмпирические формулы найдены с помощью регрессионного анализа по методу наименьших квадратов. Выбор типа регрессионной зависимости осуществлялся на основе максимальной близости индекса корреляции к 1. Полученные зависимости справедливы в диапазоне скоростей - от 0,1 до 1,5 м/с, чисел Рейнольдса - от 2500 до 25000.

Сравнение величины среднего расхождения экспериментальных и модельных функций распределения показало, что гидродинамическую структуру потоков в статическом смесителе наиболее точно описывает ячеечная модель. Значение её среднего расхождения во всех случаях почти вдвое меньше среднего расхождения с диффузионной моделью. Поэтому последующие графики будут построены относительно параметра ячеечной модели – числа ячеек m . Здесь наблюдается некоторое несоответствие, т.к.,

согласно литературным источникам, для проточных аппаратов без секционирования наиболее применима диффузионная модель. Объяснить это можно тем, что выражение для функции распределения (6) получено для аппаратов значительной длины и малого сечения (с отношением $L/D > 10$), в то время как отношение высоты насадочного слоя к диаметру статического смесителя во всех экспериментах не превышало 5.

Таблица 2 - Экспериментальные зависимости для керамических колец Рашига 25x25x3

Зависимость	Формула	Среднее отклонение, %
Перепада давления от скорости течения	$\frac{\Delta P}{H} = 169w^2 + 15w$	4,0
Кэф. сопротивления от числа Рейнольдса	$\xi = \frac{26,2}{Re^{0,16}}$	3,2
Числа ячеек от скорости течения	$m = \frac{36,9}{w^{0,235}}$	12,9
Кэф. продольного перемешивания от числа Рейнольдса	$D_L = 3,6 \cdot 10^{-8} Re^{1,36}$	10,5

Также было замечено, что для всех проведенных экспериментов выполняется известное соотношение [5-6]:

$$m \approx 1 + \frac{Pe_L}{2} \quad (11)$$

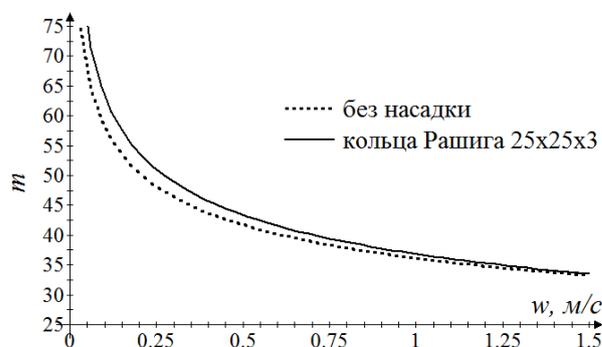


Рис. 3 - Зависимости параметра ячеечной модели, m от скорости течения w для аппарата со слоем из керамических колец Рашига 25x25x3 и аппарата без слоя насадки, рассчитанные по формулам табл. 2

На рис. 3 показана зависимость параметра ячеечной модели, m от скорости течения в аппарате w . Из рисунка видно, что достаточно большие элементы насадки ($D/d_3 = 6,6$) практически не оказывают заметного воздействия на гидродинамическую структуру потоков в аппарате. При этом кривая имеет нисходящий характер, который можно объяснить увеличением эффекта турбулентного перемешивания с ростом скорости течения жидкости.

На рис. 4 изображена зависимость величины перепада давления на одном метре слоя насадки $\Delta P/H$ от скорости течения жидкости w .

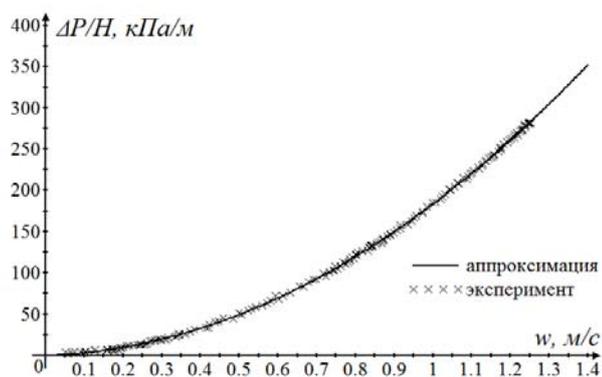


Рис. 4 - Зависимость перепада давления $\Delta P/H$ от скорости течения жидкости w для керамических колец Рашига 25x25x3

Выводы

Для проведения исследования была модернизирована установка по изучению гидродинамических характеристик проточного смесителя, выбрана методика проведения и обработки результатов эксперимента.

Экспериментальные данные обработаны по приведенной методике с помощью специально созданной программы, написанной в среде MS Excel. В результате были получены функциональные

зависимости гидравлических характеристик статического смесителя со слоем керамических колец Рашига 25x25x3, средние отклонения расчетных зависимостей от экспериментальных данных не превысило 12,9%.

Проведенные исследования показали, что керамические кольца Рашига практически не оказывают воздействия на гидродинамическую структуру потоков в статическом смесителе. При этом энергия потока в основном расходуется на преодоление гидравлического сопротивления слоя насадочных элементов при их обтекании.

Литература

1. К.А. Алексеев, А.Г. Мухаметзянова, А.В. Клинов, М.И. Фарахов, С.М. Кириченко. Вестник Казанского технологического университета, 7, 212-216 (2013).
2. Д.А. Бурмистров, М.М. Фарахов, А.В. Малыгин, А.В. Клинов. Вестник Казанского технологического университета, 11, 74-76 (2011).
3. Н.И. Гельперин, В.Л. Пибалк, А.Е. Костянян. Структура потоков и эффективность колонных аппаратов химической промышленности, М.: Химия, 1977. 264 с.
4. А.Г. Касаткин. Основные процессы и аппараты химической технологии, М.: Химия, 1971. 784 с.
5. Ю.И. Дытнерский. Процессы и аппараты химических технологий, М.: Химия, 1995. 400 с.
6. В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов и др. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии, М.: Химия, 1999. 888 с.