

А. Г. Мухаметзянова, К. А. Алексеев, Т. М. Фарахов

ГИДРОДИНАМИКА СТАТИЧЕСКИХ СМЕСИТЕЛЕЙ С НЕРЕГУЛЯРНЫМ СЛОЕМ НАСАДКИ: ЭКСПЕРИМЕНТ

Ключевые слова: гидродинамика, статический смеситель, перепад давления, нерегулярная насадка.

В статье приводятся результаты экспериментального исследования влияния высоты насадочного слоя, диаметра рабочей части аппарата и вязкости потока жидкости на гидродинамические характеристики статического смесителя с нерегулярной насадкой Инжехим. Экспериментальные данные обработаны и представлены в виде графиков и аппроксимирующих выражений, которые можно использовать в практических инженерных расчетах.

Keywords: hydrodynamics, static mixer, pressure drop, random packing.

The article presents the results of an experimental study of the effect of the packed bed height, diameter of the working part of the apparatus and the viscosity of the fluid flow on the hydrodynamic characteristics of a static mixer with random packing Inzhekhim. The experimental data are processed and presented in graphs and approximate expressions, which can be used in practical engineering calculations.

Введение

Перспективным направлением в сфере технического обеспечения процессов перемешивания является использование в качестве основного и вспомогательного смесительного оборудования статических смесителей, высокие технико-экономические показатели которых выгодно отличают их от традиционных ёмкостных аппаратов с мешалками. Поэтому статические смесители получили широкое распространение в химической, нефтехимической, пищевой, фармацевтической и других областях промышленности.

Однако практика применения статических смесителей несколько опережает теорию. Несмотря на значительное количество научных публикаций, подробный обзор которых можно найти в [1] и накопленный опыт промышленной эксплуатации, принципы работы этих аппаратов в большинстве своем остаются малоизученными. Так, особый интерес представляет вопрос о влиянии конструктивных параметров и свойств рабочей среды на эффективность работы статических смесителей.

Определенные шаги в данном направлении были предприняты в работах [2-3], в которых экспериментально исследовалось влияние размера насадочных элементов и скорости потока жидкости на гидродинамические характеристики статического смесителя с нерегулярной насадкой Инжехим [4] и кольцами Рашига. Там же приводятся данные о влиянии на эти характеристики плотности упаковки насадочного слоя.

В данной статье в продолжение работ [2-3] приводятся результаты экспериментального исследования влияния на гидродинамические характеристики статического смесителя высоты насадочного слоя, диаметра рабочей части аппарата и вязкости потока жидкости. Эксперименты проводились на гидродинамическом стенде, подробное описание которого дано в [2]. Рабочая область статического смесителя заполнялась насадочными элементами Инжехим различных размеров. Полученные в ходе работы данные, были обработаны, сведены в табли-

цы и графики. Аппроксимирующие их выражения найдены с помощью регрессионного анализа по методу наименьших квадратов. Полученные зависимости справедливы в диапазоне скоростей от 0,1 до 1,5 м/с, чисел Рейнольдса - от 1000 до 25000.

Влияние высоты насадочного слоя

Утверждение о том, что перепад давления линейно возрастает с увеличением высоты насадочного слоя, принятое априори в работе [2] было проверено экспериментально. Для этого высоту насадочного слоя, состоящего из элементов Инжехим 12, изменяли в диапазоне от 100 до 500 мм, после чего снимали показания перепада давления во всем диапазоне рабочих скоростей потока.

Результаты экспериментов представлены на рис. 1. Как видно из графиков, зависимость перепада давления от высоты насадочного слоя действительно носит линейный характер вне зависимости от скорости потока жидкости. Незначительные отклонения от линейности могут быть вызваны условиями проведения экспериментов и погрешностями при обработке результатов.

Стоит отметить что термин «высота насадочного слоя» был использован по аналогии с насадочными колоннами, несмотря на то, что статические смесители в большинстве своем устанавливаются горизонтально.

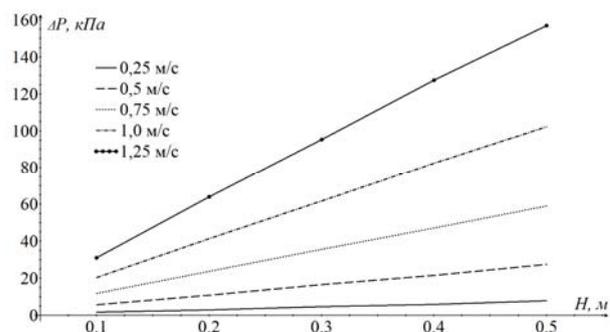


Рис. 1 - Зависимость перепада давления ΔP от высоты насадочного слоя H при различной скорости потока w

Влияние диаметра рабочей части смесителя

Для того чтобы провести исследования влияния диаметра аппарата дополнительно к существующему статическому смесителю с диаметром рабочей части 100 мм (D_y 100) был спроектирован и изготовлен аналогичный статический смеситель с диаметром рабочей части 150 мм (D_y 150). После чего для нового смесителя были определены гидродинамические характеристики, описанные в работе [2]. Полученные зависимости перепада давления от скорости потока жидкости и коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Экспериментальные зависимости перепада давления от скорости потока жидкости и коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса для D_y 150

Тип насад-ки	Зависимость	Среднее отклонение, %
Перепад давления		
Инжехим 8	$\frac{\Delta P}{H} = 353,2 \cdot w^2 + 7,5 \cdot w$	1,6
Инжехим 12	$\frac{\Delta P}{H} = 191,2 \cdot w^2 + 8,9 \cdot w$	3,5
Инжехим 16	$\frac{\Delta P}{H} = 175,4 \cdot w^2 + 4,9 \cdot w$	2,0
Инжехим 16М	$\frac{\Delta P}{H} = 298 \cdot w^2 + 0,67 \cdot w$	1,4
Инжехим 24	$\frac{\Delta P}{H} = 92,9 \cdot w^2 + 5,4 \cdot w$	1,3
Инжехим 35	$\frac{\Delta P}{H} = 19,5 \cdot w^2 + 2,2 \cdot w$	3,5
Коэффициент гидр. сопротивления		
Инжехим 8	$\xi = \frac{10,9}{Re^{0,14}}$	4,4
Инжехим 12	$\xi = \frac{9,4}{Re^{0,11}}$	3,6
Инжехим 16	$\xi = \frac{13,1}{Re^{0,1}}$	3,4
Инжехим 16М	$\xi = \frac{35,2}{Re^{0,18}}$	5,0
Инжехим 24	$\xi = \frac{20,3}{Re^{0,15}}$	2,6
Инжехим 35	$\xi = \frac{190,2}{Re^{0,47}}$	5,9

Сравнение величины гидравлического сопротивления одного и того же слоя насадки в смесителях различного диаметра показало, что определенная зависимость существует, однако установить её по двум экспериментальным точкам не представляется возможным. Существенную погрешность эксперимента вносит отсутствие физической возможности обеспечить одинаковую плотность упаковки насадочного слоя для разных смесителей, влияние которой может составлять до 10% [2].

В целом наблюдается, что перепад давления для маленьких насадок (размер элемента 8 и 12 мм) больше в смесителе небольшого диаметра, а для больших (16 мм и более) – наоборот (рис. 2). При этом отклонение по своему абсолютному значению тем больше, чем больше размер элемента насадочного слоя. Так для слоя Инжехим 8 отклонение составило 6,25%; для Инжехим 12 - 6,79%; для Инжехим 16 - 22,44%; Инжехим 16М - 16,22%. Подобная закономерность может быть следствием влияния «пристеночного эффекта» (различия в плотности упаковки элементов, прилегающих к стенкам аппарата и в его центральной части), который усиливается с увеличением размера насадки.

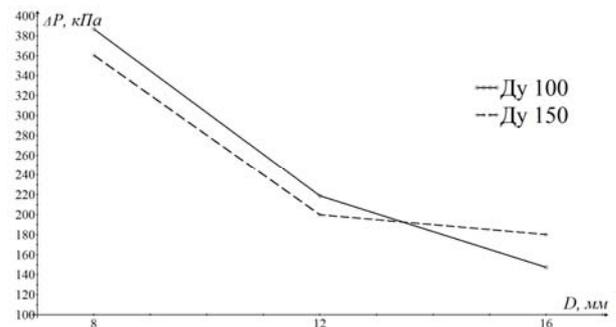


Рис. 2 - Зависимость перепада давления ΔP от размера элемента D для 1 м насадочного слоя при скорости потока w 1 м/с

Влияние вязкости потока

Обычно для проведения экспериментов по изучению влияния вязкости потока используют доступные жидкости с отличными от воды показателями вязкости, однако для данного гидродинамического стенда такие эксперименты потребовали бы очень большой объем этих жидкостей ($\sim 1 \text{ м}^3$). Поэтому вязкость воды в данных экспериментах была увеличена путем добавления небольшого количества 10% раствора поливинилового спирта (ПВС) марки 20/1 по ГОСТ 10779-78. Определение вязкости проводилось с помощью капиллярного вискозиметра ВПЖ-2. Гидродинамические характеристики статического смесителя были получены по известной методике [2] и представлены на рис. 3 и в табл. 2.

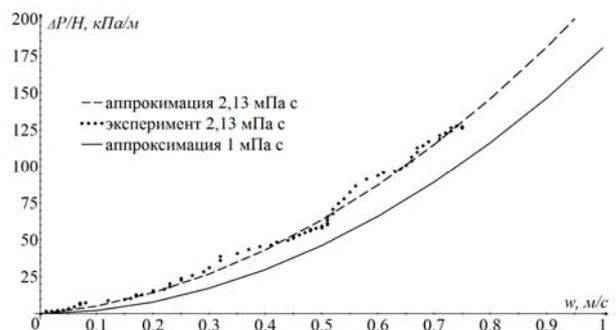


Рис. 3 - Перепад давления ΔP в статическом смесителе D_y 150, заполненного насадкой Инжехим 16 при различной вязкости потока

В результате эксперимента было установлено, с увеличением вязкости основного потока жидкости гидравлическое сопротивление слоя насадки увеличивается. Однако полученная величина гидравлического сопротивления слоя оказалась выше теоретически ожидаемой. Так, согласно уравнению Эргуна [5], при увеличении вязкости в 2,13 раза второе слагаемое правой части зависимости для перепада давления (табл. 2) должно увеличиваться также в 2,13 раза; а первое слагаемое – оставаться неизменным. В эксперименте же с учетом погрешности первое слагаемое можно принять за условно постоянное (175,4 против 184,8), а второе слагаемое увеличилось в более чем 5 раз (от 4,9 до 34,8). При этом значения коэффициента гидравлического сопротивления вообще не должно было измениться, т.к. критерий Рейнольдса учитывает изменение вязкости, чего не наблюдалось.

Таблица 2 - Экспериментальные зависимости гидравлических характеристик статического смесителя при вязкости жидкости 2,13 мПа с

Тип насадки / Д, смесителя	Зависимость	Среднее отклонение, %
Перепад давления		
Инжехим 12 / 100	$\frac{\Delta P}{H} = 238,4 \cdot w^2 + 74,2 \cdot w$	6,7%
Инжехим 16 / 150	$\frac{\Delta P}{H} = 184,8 \cdot w^2 + 34,8 \cdot w$	6,2%
Коэффициент гидр. сопротивления		
Инжехим 12 / 100	$\xi = \frac{86,9}{Re^{0,8}}$	6,3%
Инжехим 16 / 150	$\xi = \frac{6252}{Re^{0,76}}$	12,3%

Объяснить это явление можно следующим образом. В ходе эксперимента на фронтальной стороне насадочного слоя собирались длинные белые «нити» из поливинилового спирта. Они могли способствовать забиванию проходного сечения слоя насадки, и как следствие увеличивать гидравлическое сопротивление всего слоя. Кроме того, растворенные в воде длинные цепочки молекул поливини-

лового спирта в первом приближении можно принять за волокнистую суспензию, которая согласно [6], имеет отчетливо выраженную аномалию вязкости уже при очень малых концентрациях. В пользу данного объяснения говорит также появление колебаний величины перепада давления при изменении скорости потока (рис. 3). Поэтому полученные в данной работе аппроксимирующие зависимости справедливы только для растворов поливинилового спирта, тогда как для получения более достоверных экспериментальных данных необходимо искать другие пути изменения вязкости воды.

Выводы

Таким образом, в работе были получены данные о влиянии высоты насадочного слоя, диаметра рабочей части аппарата и вязкости потока жидкости на гидродинамические характеристики статического смесителя. И, несмотря на то, что полученные результаты имеют ограниченную область применения, вследствие определенных сложностей экспериментального исследования аппаратов с нерегулярным насадочным слоем на данной установке, их можно использовать в практических инженерных расчетах. Также было установлено, что влияние указанных параметров обязательно необходимо учитывать при проектировании аппаратов данного типа.

Литература

1. R.K. Thakur, Ch. Vial, K.D.P. Nigam, E.B. Nauman, G. Djelveh. Chemical Engineering Research and Design, 7, 787-826 (2003).
2. К.А. Алексеев, А.Г. Мухаметзянова, А.В. Клинов, М.И. Фарахов, С.М. Кириченко. Вестник Казанского технологического университета, 7, 212-216 (2013).
3. К.А. Алексеев, А.Г. Мухаметзянова. Вестник Казанского технологического университета, 23, 152-155 (2013).
4. М.И. Фарахов, А.Г. Лаптев. Вестник Казанского технологического университета, 9, 152-158 (2011).
5. Ergun Sabri. Fluid flow through packed columns / Chem. Eng. Prog, 1952. – V.48.
6. Богданов В.В. и др. Эффективные малообъемные смесители / В.В. Богданов, Е.И. Христофоров, Б.А. Клоцунг. – Л.: Химия, 1989. – 224 с.

© А. Г. Мухаметзянова – д-р техн. наук, проф. каф. процессов и аппаратов химической технологии КНИТУ, asia@kstu.ru; К. А. Алексеев – аспирант той же кафедры, konstantin_aleks@inbox.ru; Т. М. Фарахов – к.т.н., инженер ООО Инженерно Внедренческого Центра «Инжехим».

© A. G. Mukhametzyanova - doctor of technical science, Professor Department of Processes and devices of chemical technologies KNIU, asia@kstu.ru; K. A. Alekseev - a graduate student in the same department, konstantin_aleks@inbox.ru; T. M. Farakhov - candidate of technical science, Engineer of Engineering and Innovation Center "Inzhehim".