

УДК 66.021.1:66.063.8

К. А. Алексеев, А. Г. Мухаметзянова, А. В. Клинов,
М. И. Фарахов, С. М. Кириченко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОЧНОГО СТАТИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ НАСАДОЧНОГО ТИПА

Ключевые слова: статический смеситель, перепад давления, экспериментальная установка, нерегулярная насадка.

Проведен анализ оценок эффективности работы статических смесителей. В качестве критерия оценки выбрана величина перепада давления. Создана экспериментальная установка для изучения гидравлических характеристик проточного статического смесителя насадочного типа. Экспериментальные данные обработаны и представлены в виде графиков и аппроксимирующих выражений.

Keywords: static mixer, pressure drop, pilot plant, random packing.

The analysis estimates the efficiency of static mixers. As a criterion for the evaluation of the magnitude of the pressure drop. Created pilot plant to study the hydraulic characteristics of the flow static mixer packed type. The experimental data are processed and presented in graphs and approximate expressions.

Введение

Статические смесители получили широкое распространение в нефтехимической, пищевой, фармацевтической и других областях промышленности. Они компактны, не содержат внутренних подвижных устройств, просты в изготовлении и эксплуатации, обладают небольшой металлоемкостью и отвечают современным требованиям, предъявляемым к технологическому оборудованию в области энерго- и ресурсосбережения. Благодаря этому их применение является привлекательной альтернативой традиционным аппаратам с механическими перемешивающими устройствами.

На данный момент разработано множество как отечественных, так и зарубежных конструкций статических смесителей, которые используются в процессах смешения, эмульгирования, диспергирования, водоподготовки и т. д. Однако всем без исключения конструкциям статических смесителей присущ один недостаток – высокое гидравлическое сопротивление. Поскольку перемешивание и диспергирование жидкостей осуществляется за счет энергии потока при его многократном делении на элементарные струйки и их переориентации, эти аппараты требуют установки мощного насосного оборудования. Поэтому целью данной статьи является исследование гидравлических характеристик проточного статического смесителя. Объектом исследования выступает статический смеситель насадочного типа, как наиболее часто встречающийся в химической технологии.

Оценка эффективности работы статического смесителя

Оценке эффективности работы статических смесителей посвящено немало работ [1-5]. Однако, при всем многообразии подходов, перепаду давления всегда уделяется особое внимание.

Так в работе [1] в качестве меры эффективности работы статического смесителя используется величина диссипации энергии, ε – энергии, затрачиваемой в единицу времени на преодоление трения частиц единицы массы жидкой среды для смешения её компонентов, т.е. для внедрения одних частиц жидкой среды между другими. Приводится, что ε связана с перепадом давления следующей зависимостью:

$$\Delta P = \varepsilon \tau \rho, \quad (1)$$

где $\tau = L/w$ – среднее время прохождения жидкости через статический смеситель длиной L со скоростью w , с; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Другие авторы [2] для той же оценки используют величину мощности, $P_{\text{смесит}}$, необходимой для подачи смеси, которая так же связана с перепадом давления:

$$P_{\text{смесит}} = \Delta P \cdot V_{\text{жс}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{жс}}$ – объемный расход, м³/с.

В литературе можно встретить расширенную версию (2), в виде отношения насосной мощности, затраченной статическим смесителем, к расходу энергии на рабочем колесе мешалки в традиционном емкостном аппарате:

$$\frac{\text{Мощность для статического смешения}}{\text{Мощность для механического перемешивания}} = \frac{\Delta P \cdot V_{\text{жс}}}{N_{\text{мешалки}}} \quad (3)$$

Подобный подход позволяет проводить прямое сравнение между статическими смесителями и аппаратами с мешалкой, но его недостаток заключается в том, чтобы сравнение было проведено при аналогичных условиях (расходе и плотности среды).

В [6] для оценки характеристик перемешивающих устройств используется такая величина, как интенсивность перемешивания, I . Она представляет собой энергию N , которую необходимо затратить на перемешивание единицы объема ($N/V_{\text{жс}}$) или массы ($N/\rho Q$) жидкости в единицу времени для достижения определенного

качества смеси. Сообщается, что интенсивность перемешивания обуславливает характер движения жидкости в аппарате. Повышение интенсивности перемешивания всегда связано с увеличением энергозатрат, а технологический эффект от увеличения интенсивности перемешивания ограничен строго определенными пределами. Поэтому интенсивность перемешивания следует определять исходя из условий достижения максимального технологического эффекта при минимальных энергозатратах.

Применительно к процессам смешения в статических смесителях, которые протекают за счет энергии потока жидкости, можно предположить, что N непосредственно связана с ΔP . Эта связь может быть найдена из уравнения (2):

$$I = \frac{\Delta P \cdot V_{жс} \cdot t}{V_{жс}} = \Delta P \cdot t \quad (4)$$

Сравнение эффективности работы статических смесителей с традиционными емкостными аппаратами с помощью данного критерия дает выражение (3).

В зарубежной литературе [5] для оценки эффективности работы статических смесителей часто используется величина Z , выражающая отношение коэффициента гидравлического сопротивления в статическом смесителе, $\xi_{смесит}$ к коэффициенту гидравлического сопротивления в пустой трубе, $\xi_{тр}$:

$$Z = \frac{\xi_{смесит}}{\xi_{тр}} = \frac{\Delta P_{смесит}}{\Delta P_{тр}} \quad (5)$$

Эта формулировка удобна при врезке статических смесителей в существующие трубопроводы, т.к. непосредственно позволяет оценить увеличение перепада давления. Однако, этим критерием сложно пользоваться при проектировании аппарата, потому что диаметр аппарата может отличаться от диаметра подводящей трубы. Кроме того, использование отношения коэффициентов сопротивления сопряжено с некоторыми трудностями при анализе работы статических смесителей, работающих в турбулентных режимах, т.к. в турбулентных потоках перепад давления в статическом смесителе на несколько порядков выше, чем в пустой трубе и увеличивается пропорционально квадрату скорости. Поэтому наибольшее распространение такая формулировка получила при описании аппаратов, работающих в ламинарных режимах, и используется скорее производителями и поставщиками оборудования, нежели исследователями. В [5] приводится сводная таблица известных корреляций для Z .

Наиболее часто в экспериментальных условиях к оценке эффективности смесителя не прибегают, а по известному перепаду давления, определяют коэффициент гидравлического сопротивления, используя выражения для потерь напора. Для аппаратов, заполненных слоем насадки, выражение записывается следующим образом:

$$\Delta P = \xi \frac{H}{d_э} \frac{\rho w_{cp}^2}{2}, \quad (6)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; H – высота слоя насадки, м; w_{cp} – средняя скорость, м/с, $d_э$ – эквивалентный диаметр каналов насадки, м.

$$d_э = \frac{4V_{св}}{a}, \quad (7)$$

где $V_{св}$ – свободный объем, м³/м³; a – удельная поверхность, м²/м³.

Значение коэффициента сопротивления зависит от формы насадки и характера движения среды:

$$\xi = \frac{C_t}{Re^m}, \quad (8)$$

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

$$Re = \frac{w_{cp} d_э}{\nu_{жс}}, \quad (9)$$

где $\nu_{жс}$ – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

Константа m в выражении (8) является функцией числа Рейнольдса, и как правило уменьшается с увеличением Re . При высоких числах Рейнольдса m приближается к 0, и ξ становится постоянным. Подобное поведение наблюдается в пустых трубах с $\xi_{тр} \rightarrow 0,02$ при $Re \rightarrow \infty$.

Так для колец Рашига коэффициент ξ может быть вычислен по формуле [7]:

$$\xi = \frac{16}{Re^{0,2}} \quad (10)$$

Иногда выражение (8) записывают в виде

$$\xi = \frac{C_{t1}}{Re} + \frac{C_{t2}}{Re^m} + C_{t3}, \quad (11)$$

где C_{t1} , C_{t2} , C_{t3} и m – эмпирические константы, а их сумма отражает три различных режима движения жидкости: ламинарный (C_{t1}/Re), переходный (C_{t2}/Re^m) и турбулентный (C_{t3}).

В зарубежной литературе чаще, вместо ξ , получают зависимости для критерия Ньютона (Ne):

$$Ne = \frac{\Delta P}{\rho w_{cp}^2} \frac{d_э}{H} \quad (12)$$

Полученные значения Ne также записывают в виде зависимости от числа Re . Известные корреляции можно найти в [8].

Таким образом, величина перепада давления может выступать одним из критериев оценки эффективности работы статических смесителей, и является необходимым, но не достаточным условием для их описания. Эта величина легко поддается измерению при использовании чувствительных и относительно дешевых пьезорезистивного или пьезоёмкостного датчиков.

Описание экспериментальной установки

Для того чтобы исследовать гидравлические характеристики проточного статического смесителя была создана экспериментальная установка, принципиальная схема которой показана на рис. 1.

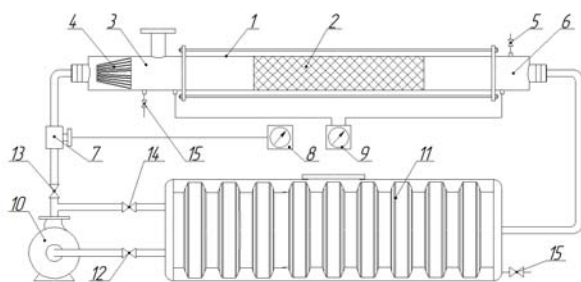


Рис. 1 - Принципиальная схема установки: 1 - участок наблюдения (оргстекло); 2 - слой насадки; 3 - узел подвода компонентов; 4 - распределитель потока; 5 - пробоотборник; 6 - узел вывода смеси; 7 - первичный преобразователь расхода; 8 - измерительный преобразователь расхода; 9 - датчик дифференциального давления; 10 - насос; 11 - бак; 12, 13, 14 - вентили; 15 - слив

Технические характеристики установки
Внутренний диаметр смесителя – 100 мм
Диаметр подводящего патрубка – 50 мм
Производительность по воде – до 70 м³/ч
Высота насадочного слоя – варьируется, до 1 м
Емкость смесителя – 10 л
Объем бака – 1 м³

Основным элементом установки является модель статического смесителя (рис. 2), который состоит из участка наблюдения 1, узла подвода компонентов 3, и узла вывода готовой смеси 6. Участок наблюдения служит для изучения поведения элементов потока в аппарате. Он представляет собой трубу из прозрачного органического стекла Plexiglas XT с внутренним диаметром 100 мм и длиной 0,95 м. Смешение в аппарате достигается за счет турбулизации потока в слое насадки 2, который удерживается в трубе с помощью опорных решеток. Чтобы уменьшить воздействие внезапного расширения на входе жидкости в статический смеситель и на минимально возможном расстоянии от входа сформировать профиль скорости в узле подвода компонентов установлен распределитель потока 4. Для отбора проб в аппарате предусмотрен пробоотборник 5, для слива жидкости – вентиль 13.

Подача воды в смеситель производится центробежным насосом 9 типа FN-50-125 производительностью по воде до 70 м³/ч из бака 11 ёмкостью 1 м³. Регулирование расхода жидкости производится с помощью вентиля 12, 13 и 14, установленных на линиях всасывания, нагнетания и перепуска. Отработанная жидкость возвращается в бак.

Расход жидкости измеряется на линии нагнетания электромагнитным измерительным преобразователем расхода ИПРЭ-7-50, первичный

преобразователь 7 и измерительный преобразователь 8 которого пространственно разнесены (предел допустимой относительной погрешности измерения объемного расхода $\pm 1,0\%$). Перепад давления измеряется на участке наблюдения многопредельным датчиком дифференциального давления ДДМ-03-160ДИ-МИ (предел допустимой основной погрешности датчика $\pm 0,5\%$).

Все элементы установки смонтированы на сварной раме.

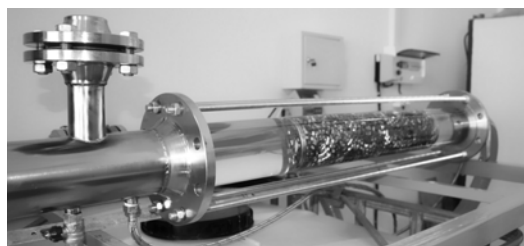


Рис. 2 - Модель статического смесителя

В экспериментах использовались насадочные элементы Инжехим-2000 [9] различных размеров, представленных на рис.3, высота слоя была постоянной и равнялась 0,5 м. Характеристики насадки можно найти в работах [10-12].

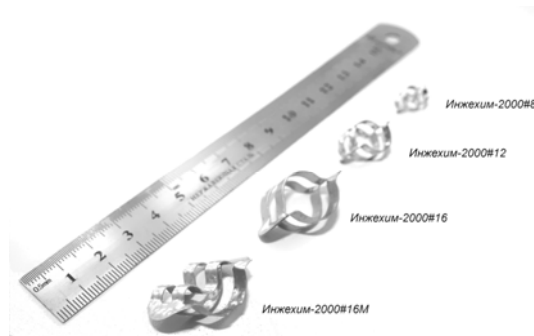


Рис. 3 - Насадочные элементы Инжехим-2000

Результаты экспериментов

В результате проведенных экспериментов были получены зависимости величины перепада давления на слое насадки от расхода жидкости. Экспериментальные данные были обработаны по выражениям (6)-(9), получены аппроксимирующие выражения.

Эксперименты подтвердили, что величина падения давления зависит от типоразмера используемых элементов насадочного слоя и их характеристик. В целом наблюдается, что с уменьшением размера насадки возрастает гидравлическое сопротивление, что можно объяснить уменьшением размера образующихся в насадочном слое каналов и увеличением их извилистости. Так, для насадки Инжехим-2000#8 при расходе 20 м³/ч падение давления составило 90,5 кПа; а для Инжехим-2000#16 – только 34 кПа. Гидравлическое сопротивление слоя насадки оказывает значительное воздействие на производительность насоса. Максимально

достигнутая величина расхода при использовании насадки Инжехим-2000#8 составила 29 м³/ч, а Инжехим-2000#16 – 39,5 м³/ч, что меньше значения максимального расхода без нагрузки (70 м³/ч).

Экспериментальные кривые зависимости величины перепада давления на одном метре насадки ($\Delta P/H$) от скорости жидкости (w) изображены на рис. 4. Аппроксимирующие выражения, описывающие эти кривые, представлены в табл. 1. Результаты хорошо согласуются с теорией, согласно которой величина падения давления пропорциональна квадрату скорости жидкости. Экспериментальные зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса даны в табл. 2. Такие же зависимости были получены и в [9] для насадочных элементов Инжехим-2000 в системе воздух-вода. Максимальное расхождение между полученными значениями и данными [9] не превышает 9,5%.

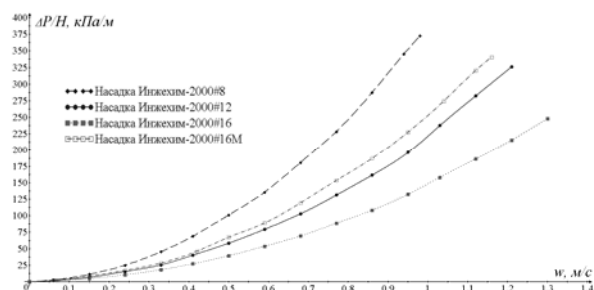


Рис. 4 - Экспериментальные кривые относительной величины падения давления от скорости жидкости

Зависимости в табл. 1 и табл. 2 справедливы в интервале чисел Рейнольдса:
 $250 \leq Re \leq 5000$ (13)

Таблица 1 - Экспериментальные зависимости относительного перепада давления от скорости жидкости

Тип насадки	Зависимость	Максимальное отклонение
Инжехим-2000#8	$\frac{\Delta P}{H} = 380,0w^2 + 7,0w$	6%
Инжехим-2000#12	$\frac{\Delta P}{H} = 222,5w^2 - 1,3w$	7%
Инжехим-2000#16	$\frac{\Delta P}{H} = 143,3w^2 + 4,0w$	4%
Инжехим-2000#16М	$\frac{\Delta P}{H} = 249,5w^2 + 3,6w$	3,5%

В ходе экспериментов дополнительно было исследовано влияние укладки слоя насадки. Для этого слой насадки Инжехим-2000#16 несколько раз был извлечен из смесителя и уложен снова, после чего получены кривые зависимости падения давления от расхода. Было установлено, что

величина перепада давления колеблется в интервале $\pm 10\%$ от среднего значения.

Таблица 2 - Экспериментальные зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса

Тип насадки	Зависимость	Максимальное отклонение
Инжехим-2000#8	$\xi = \frac{20,93}{Re^{0,21}}$	8%
Инжехим-2000#12	$\xi = \frac{31,25}{Re^{0,24}}$	10%
Инжехим-2000#16	$\xi = \frac{70,15}{Re^{0,3}}$	12%
Инжехим-2000#16М	$\xi = \frac{65,7}{Re^{0,26}}$	11%

Как видно из рис. 4, несмотря на то, что насадка Инжехим-2000#16М и является модификацией насадки Инжехим-2000#16, при равных размерах элемента она обладает большим гидравлическим сопротивлением. Так при скорости 1 м/с падение давления составило 253,3 кПа, что почти вдвое превышает величину падения давления в 149,5 кПа для Инжехим-2000#16.

Оценка погрешности результатов измерений на экспериментальной установке показала, что средняя относительная погрешность с доверительной вероятностью 0,95 составляет 3%.

В ходе проведения экспериментов в потоке жидкости можно было наблюдать присутствие небольших пузырьков газа, которые появлялись, если в баке оставалось некоторое количество воздуха. Их наличие позволило визуально наблюдать за режимами течения жидкости по характерным траекториям движения пузырьков.

Выводы

Проведен анализ критериев оценки эффективности работы статических смесителей. Сделан вывод, что величина перепада давления может выступать одним из таких критериев.

Для исследования гидравлических характеристик проточного статического смесителя насадочного типа создана экспериментальная установка.

Проведены эксперименты по изучению зависимости перепада давления на слое насадки от расхода жидкости, результаты обработаны и представлены в виде графиков и аппроксимирующих выражений. Максимальное отклонение найденных зависимостей от данных эксперимента составило 12%. Полученные данные хорошо согласуются как с теорией, так и с ранее опубликованными корреляциями, их расхождение не превышает 9,5%.

Показано, что величина падения давления зависит от типоразмера используемых элементов

насадочного слоя и их характеристик. С уменьшением размера насадки возрастает гидравлическое сопротивление.

При различной укладке слоя насадки величина перепада давления колеблется в интервале $\pm 10\%$ от среднего значения.

Средняя относительная погрешность с доверительной вероятностью 0,95 составляет 3%.

Литература

1. Ф.Ф. Чаусов. Химическое и нефтегазовое машиностроение, 3, 11-14 (2009).
2. Т.М. Фарахов, А.Г. Лаптев. Вестник Казанского государственного энергетического университета, 4, 20-24 (2011).
3. А.Г. Лаптев, Т.М. Фарахов, О.Г. Дударовская. Нефтегазовое дело, 4, 387-408 (2012).
4. Ю.М. Данилов, А.Г. Мухаметзянова, Р.Я. Дебердеев, А.А. Берлин. ТОХТ, 1, 81-84 (2011).
5. R.K. Thakur, Ch. Vial, K D.P. Nigam, E.B. Nauman, G. Djelveh. Chemical Engineering Research and Design, 7, 787-826 (2003).
6. Ю.И. Дытнерский. Процессы и аппараты химических технологий, М.: Химия, 1995. 400 с.
7. В.М. Рамм. Абсорбция газов, М.: Химия, 1976. 656 с.
8. A. Baumann, S.A.K. Leelani, B. Holenstein, P. Stossel, E.J. Windhab. Chemical Engineering Science, 73, 354-365 (2012).
9. М.И. Фарахов, А.Г. Лаптев. Вестник Казанского технологического университета, 9, 152-158 (2011).
10. Т.М. Фарахов, М.М. Башаров, И.М. Шигапов. Нефтегазовое дело, 2, 192-207 (2011).
11. Д.А. Бурмистров, М.М. Фарахов, А.В. Малыгин, А.В. Клинов. Вестник Казанского технологического университета, 11, 74-76 (2011).
12. С.В. Карпеев, М.И. Фарахов, Д.А. Бурмистров. Вестник Казанского технологического университета, 11, 532-535 (2010).

© **К. А. Алексеев** – аспирант каф. процессов и аппаратов химической технологии КНИТУ, konstantin_aleks@inbox.ru; **А. Г. Мухаметзянова** – д-р техн. наук, доцент той же кафедры, asia@kstu.ru; **А. В. Клинов** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. процессов и аппаратов химической технологии КНИТУ, alklin@kstu.ru; **М. И. Фарахов** – д-р техн. наук, проф. той же кафедры, дир. ООО ИВЦ «Инжехим»; **С. М. Кириченко** – зав. лабораторией той же кафедры.