

УДК: 66.03:664.3.033.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ЭМУЛЬСИИ В СТАТИЧЕСКОМ СМЕСИТЕЛЕ ВИХРЕВОГО ТИПА.

М.О. Сиволоцкий, О.В. Чагин, В.Н. Блиничев, И.В. Постникова
Ивановский государственный химико-технологический университет

Статья посвящена исследованию работы статического смесителя вихревого типа. При разработке конструкции статического смесителя особое внимание уделяется конструкции внутренних смесительных элементов, определяющих основные параметры смесителя: качество смешения и его гидравлическое сопротивление. Описан механизм дробления капель масла в воде при турбулентном течении смешиваемых жидкостей в смесителе. Представлены результаты исследования качества полученной эмульсии вода-масло в статическом смесителе. Исследования процесса эмульгирования водно-маслянной смеси в статическом смесителе с пакетно-вихревой насадкой в качестве смешивающего устройства показали, что даже при максимальной скорости течения жидкостей возможно получить достаточно однородную по размерам капель масла эмульсию. Установлено, что коэффициент вариации распределения капель по размерам уменьшается с увеличением критерия Вебера и числа вихревых ячеек по длине насадки. Предложено оценивать качество смешения жидкостей по значению коэффициента вариации размеров капель.

Ключевые слова: статический смеситель, качество смешения, смешивающий элемент, ячейка смешивающего элемента, коэффициент вариации, критерий Вебера.

Процесс перемешивания является одним из самых распространенных в химической технологии и смежных с ней отраслях промышленности [1]. Среди множества аппаратов с перемешивающими устройствами широкое применение нашли статические смесители. Принцип действия статических смесителей основан на многократном рассечении движущегося потока смесительными элементами на отдельные струи, которые перемешиваются друг с другом. Полученная тонкослойная структура потока далее усредняется вследствие влияния турбулентных пульсаций различных масштабов, величина которых определяется конструкцией смесительного устройства [2,8].

При разработке конструкции статического смесителя особый упор делается на конструкцию внутренних смесительных элементов, определяющих основные параметры смесителя: качество смешения и его гидравлическое сопротивление.

На кафедре МАХП ИГХТУ создана экспериментальная установка для исследования процесса смешения с использованием статического смесителя. На рис.1 представлена схема данной установки.

В емкостях 3 и 5 содержатся исходные смешиваемые жидкости. Насосами 2 и 6 осуществляется их подача в смеситель 1, в котором осуществляется смешение. Смеситель 1 состоит из царг, соединенных друг с другом фланцевым соединением. В них устанавливаются насадка в виде вихревых пакетов, обеспечивающих смешение жидкостей. Царги смесителя выполнены из полипропилена. Смешиваемые жидкости поступают в ячейки смешивающего устройства 12 в виде вихревых насадок, где многократно рассекаются на перемешивающиеся между собой струи. Соотношение смешиваемых жидкостей поддерживается дозирующим насосом 6. Смешанный поток собирается в накопительной емкости 4.

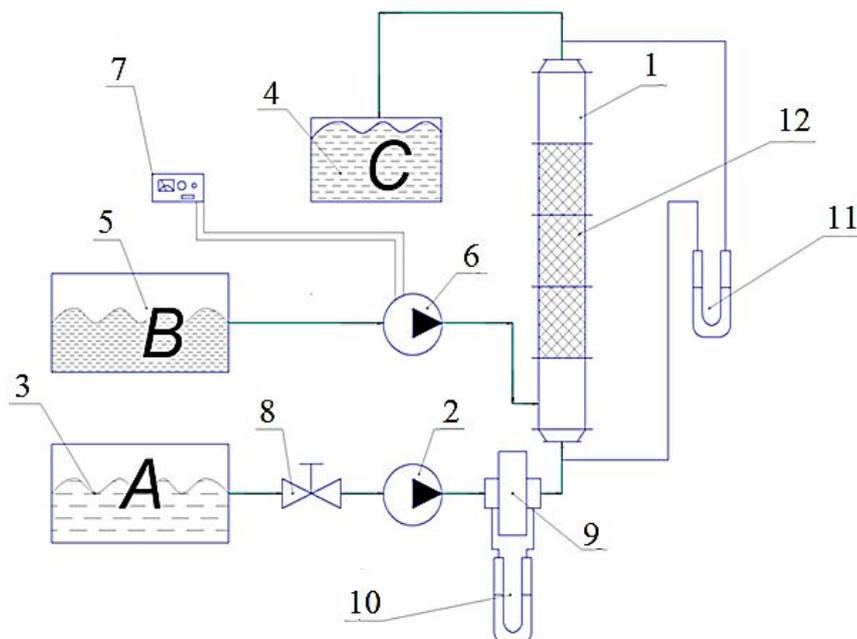


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процесса смешения:

1 - смеситель; 2 – насос питающий; 3 - емкость с жидкостью (1); 4 - емкость с готовой смесью; 5 - емкость с жидкостью (2); 6 - насос дозирующий; 7 - частотный регулятор; 8 - вентиль; 9 - измерительная диафрагма, 10,11 - дифференциальный манометр; 12 - пакетная вихревая насадка

В емкостях 3 и 5 содержатся исходные смешиваемые жидкости. Насосами 2 и 6 осуществляется их подача в смеситель 1, в котором осуществляется смешение. Смеситель 1 состоит из царг, соединенных друг с другом фланцевым соединением. В них устанавливается насадка в виде вихревых пакетов, обеспечивающих смешение жидкостей. Царги смесителя выполнены из полипропилена. Смешиваемые жидкости поступают в ячейки смешивающего устройства 12 в виде вихревых насадок, где многократно рассекаются на перемешивающиеся между собой струи. Соотношение смешиваемых жидкостей поддерживается дозирующим насосом 6. Смешанный поток собирается в накопительной емкости 4.

В качестве критерия эффективности работы статического смесителя выбран процесс получения достаточно однородной по размерам частиц эмульсии. В качестве смешиваемых сред использовались вода и растительное масло. Концентрация масла в полученной эмульсии составляла 2,5%. Анализ эмульсии производился на лазерном дифракционном

анализаторе «Analysette 22», который позволял определить распределение размеров частиц масла в эмульсии.

В качестве смесительного устройства использовалась пакетная вихревая насадка (ПВН). Данная насадка состоит из множества одинаковых ячеек прямоугольной формы, соединенных между собой в единый пакет как по диаметру, так и по высоте. Стенки каждой ячейки смещены относительно друг друга по вертикали, перекрывая фронтальную щель на входе в ячейку за счет удлиненных, загнутых внутрь окончаний, образующих завихритель [2]. Пакетная насадка хорошо масштабируется, так как, даже при увеличении диаметра аппарата, возрастает лишь число ячеек в поперечном сечении пакета [5].

Смесительное устройство работает следующим образом: жидкость попадает внутрь ячейки через фронтальный и боковые каналы и распределяется равномерно по ее внутреннему объему вихревым движением жидкости, который образуется в результате взаимодействия потоков жидкости, попадающих внутрь ячейки.

ки через эти каналы. На выходе из ячейки поток жидкости делится опять на три потока и покидает ячейку смесительного элемента через два боковых и один фронтальный канал. Перед тем, как поступить в ячейку следующего слоя смесительного устройства, потоки сталкиваются друг с другом, образуя сложное вихревое движение, которое также характеризуется большими скоростями сдвига. Вихревое движение потоков усредняет их характеристики и усредненный поток поступает на вход ячейки следующего слоя ячеек смесительного устройства. Если напряжения сдвига вихревого движения потока превосходят силу поверхностного натяжения попавшей в этот вихрь капли, то эта капля дробится. Вихревое движение внутри ячейки характеризуется большими скоростями сдвига, которые позволяют существенно понизить эффективную вязкость в жидкости [4].

Форма ячейки приводит к разделению потоков на входе и выходе из нее на равные части, каждая из которых по-

ступает в соседние ячейки следующего слоя ячеек смесительного устройства, тем самым достигается изотропность потоков по поперечному сечению аппарата (рис. 2). Отсутствие прямолинейных каналов вдоль оси всех ячеек смесительного устройства полностью исключает вероятность проскоков отдельных струй жидкости без их активного взаимодействия друг с другом. Поскольку сопротивление ячеек в пакете одинаково, то жидкая среда распределяется по всем ячейкам слоя равномерно. Явления, которые происходят в одной ячейке, также характерны и для других соседних ячеек [5]. Многократное дробление жидкостного потока, а также изменение направления движения потоков внутри смесительного устройства являются основными факторами, которые приводят к увеличению дисперсности смешиваемых сред.

Расположение каналов и процесс дробления капель в ячейке смесительного элемента схематично представлено на рис. 2.

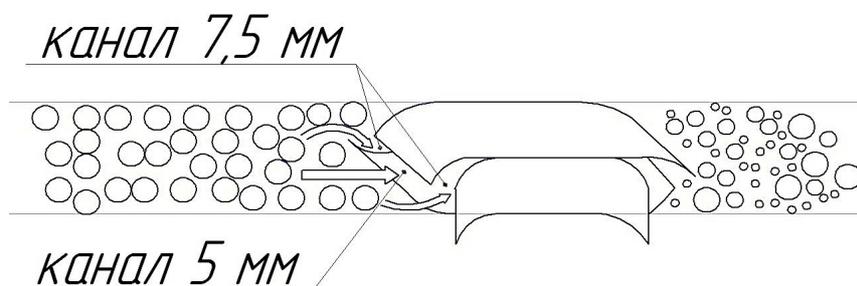


Рис.2. Схема дробления и распределения капель в насадке

Как уже отмечалось, каждая ячейка смесительного элемента имеет три канала как на входе, так и на выходе из ячейки. Фронтальный канал имеет характеристический размер 5 мм, боковые - 7,5 мм. Согласно теории дробления капель, их размер пропорционален пульсационной скорости вихревого движения, а сама пульсационная скорость пропорциональна размеру характеристического канала, в котором это вихревое движение образуется. При прохождении потока смеси через определенный канал, в ней образуют-

ся капли, размер которых зависит от характеристического размера данного канала. Капли, полученные в канале с характеристическим размером 7,5 мм, имеют «меньший» размер в сравнении с теми каплями, которые образуются в канале с характеристическим размером 5 мм, в связи с большей пульсационной скоростью в нем [3].

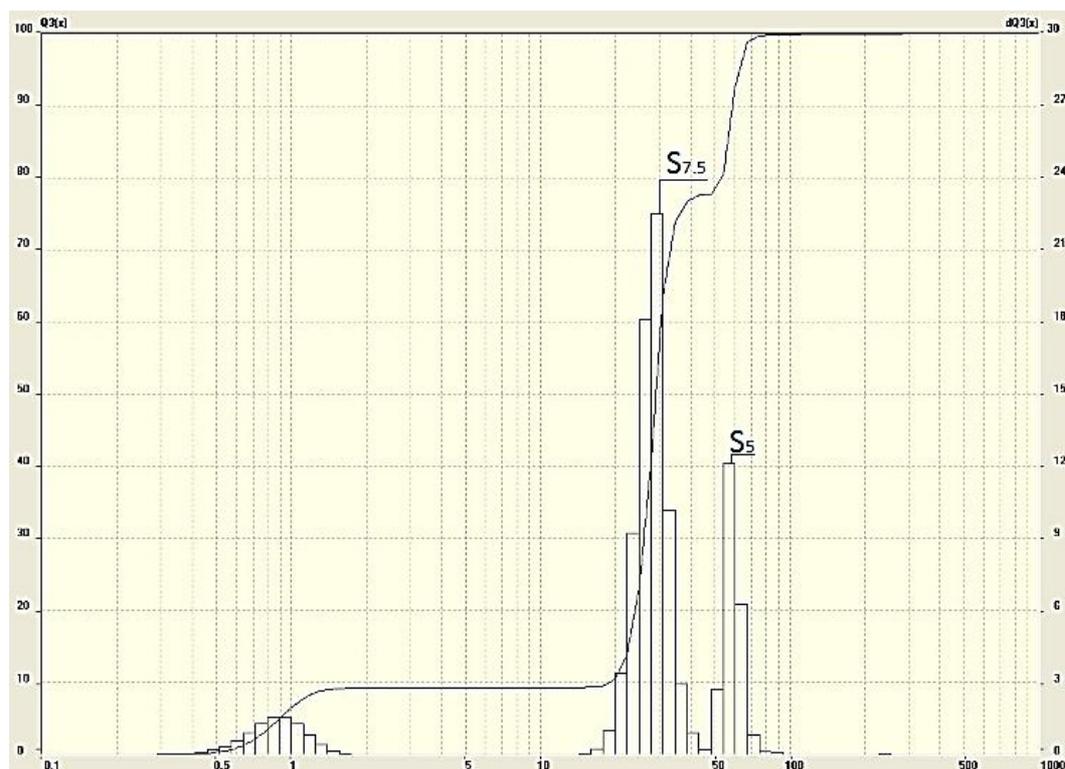


Рис. 3. График распределения количества капель масла в зависимости от их размера

Ввиду высокой турбулизации потока жидкости в смесительном устройстве, капли различных размеров равномерно распределяются по сечению потока и смесь поступает в следующую по ходу движения ячейку. В этой ячейке «мелкие» капли, попавшие в каналы 5 и 7,5 мм, уже не делятся, так как не хватает энергии потоков для их дробления. «Крупные» капли, попавшие в канал 5 мм, не дробятся по этой же причине, но другая их часть, попадающая с потоком в канал 7,5 мм, дробится до размера «мелких». Таким образом, с каждой новой ячейкой по ходу движения потока жидкости, количество «крупных» капель уменьшается, а количество «мелких» возрастает.

Размер получаемых капель масла в каждом канале ячейки определяли экспериментально при анализе полученной смеси на лазерном дифракционном анализаторе «Analysette 22». Результаты анализа также позволяли определять количество капель каждой фракции. Пример обработки экспериментальных данных представлен на рис.3.

В существующих теориях «разрушения капель» считается, что интенсивность дробления капель характеризуется значением критерия Вебера [6]. В данной работе рассчитывался приведенный критерий Вебера:

$$We^* = \frac{\rho \cdot b \cdot U^2}{\sigma},$$

где ρ – плотность смеси;

b – характеристический размер, равный поперечному размеру ячейки смесительного устройства;

U – средняя скорость движения смеси по сечению ячейки;

σ – коэффициент поверхностного натяжения.

На рис. 4 приведена экспериментально полученная зависимость средних диаметров капель масла в смеси, от режима движения жидкости в смесителе, при различном количестве вихревых ячеек смешивающего устройства по длине аппарата.

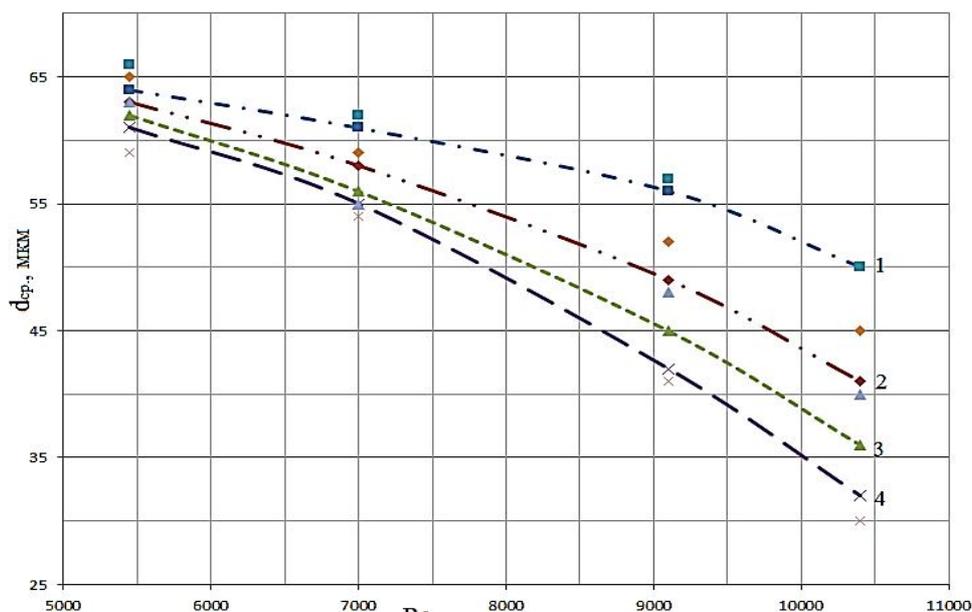


Рис. 4. Зависимость средних диаметров полученных размеров капель масла в воде от режима движения жидкости в смесителе при разном количестве ячеек смесительного устройства по длине смесителя

1 - 18 ячеек, 2 - 24 ячеек, 3 - 30 ячеек, 4 - 42 ячейки

Анализ экспериментальных данных показывает, что на размер полученных капель масла существенное влияние оказывает не только режим движения потока жидкости, но и – число ячеек смесительного элемента по длине вихревой насадки. Так при неизменном числе ячеек, например $n=42$, при изменении критерия Рейнольдса с 5450 до 10400 средний диаметр капель уменьшается от 68 мкм до 30

мкм. При постоянном значении критерия Рейнольдса, равном 10400, изменение числа ячеек с 18 до 42 приводит к уменьшению среднего диаметра капли от 50 мкм до 30 мкм. Отсюда следует, что режим движения жидкости оказывает большее влияние на изменение среднего диаметра капель масла в воде, чем увеличение числа ячеек смесительного элемента вдоль оси статического смесителя.

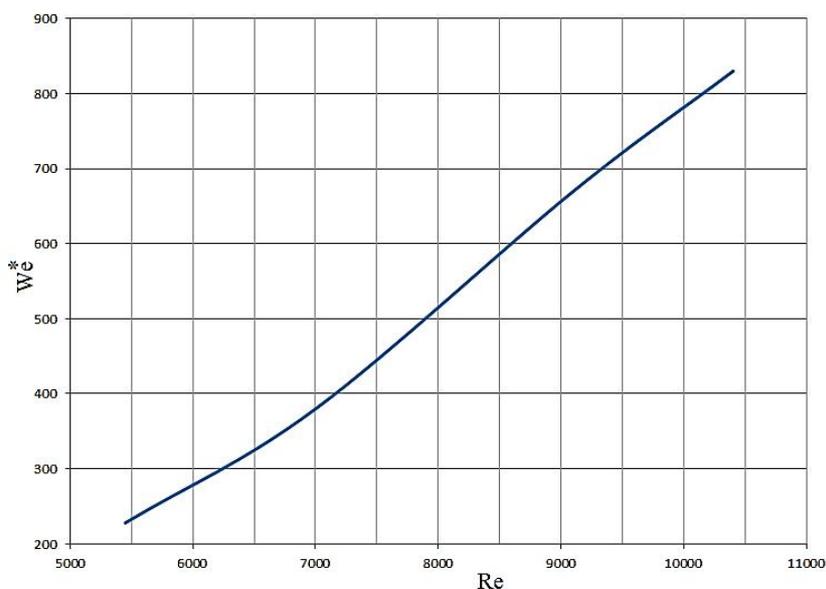


Рис. 5. Зависимость приведенного критерия Вебера от критерия Рейнольдса

С увеличением значения критерия Рейнольдса значение приведенного критерия Вебера растет. Для каждого размера капле существует режим движения жидкости, при котором динамические силы, действующие в потоке, начинают превосходить силы поверхностного натяже-

ния, что приводит к дроблению капли данного размера [7].

Ниже приведена зависимость средних диаметров капель масла в воде от приведенного критерия Вебера при разном количестве вихревых ячеек ПВН по длине смесителя.

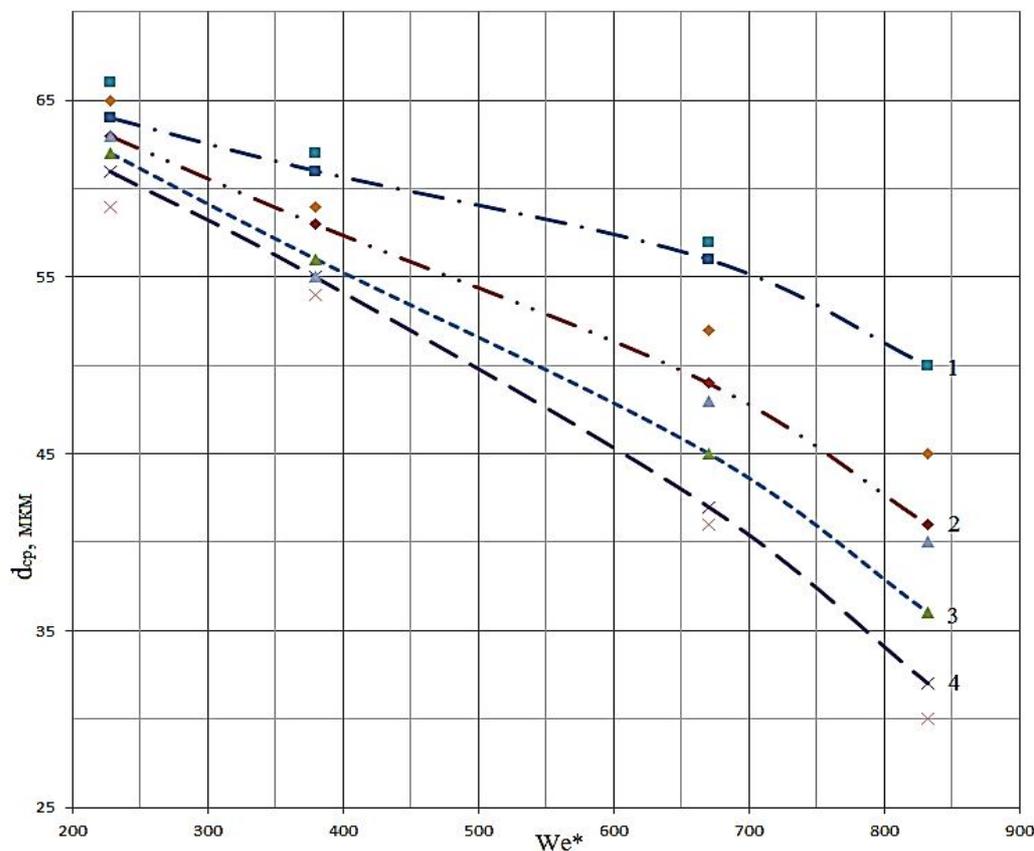


Рис. 6. Зависимость средних диаметров капель масла в воде от приведенного критерия Вебера при разном количестве ячеек смесительного устройства по длине смесителя

1 - 18 ячеек, 2 - 24 ячеек, 3 - 30 ячеек, 4 - 42 ячейки

При обработке экспериментальных данных методом наименьших квадратов была получена зависимость средних диаметров получаемых частиц капле масла в воде в зависимости от режима движения жидкой фазы и количества вихревых ячеек по длине аппарата. В данном уравнении используется приведенный критерий Вебера, как критерий разрушения капли:

$$\frac{\bar{d}}{b} = 3,33 \cdot We^{*-0,35} \cdot Re^{-0,1} \cdot n^{-2,4}, \quad (1)$$

где \bar{d} – средний диаметр получаемых частиц капле масла в воде, м;

b – характеристический размер, равный поперечному размеру ячейки

смесительного устройства, м;

n – число ячеек смесительного устройства по длине аппарата;

We^* – приведенный критерий Вебера;

Re – критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{U \cdot b \cdot \rho}{\mu},$$

U – средняя скорость движения смеси по сечению ячейки, м/с;

ρ – плотность смеси;

μ – коэффициент динамической вязкости смеси, Па · с.

Критерий Re изменялся в пределах $5450 \div 10400$, критерий We^* изменялся в пределах $86,6 \div 339,7$, что соответствова-

ло скорости потока жидкости по сечению ячейки смесительного элемента $0,51 \div 1,01$ м/с. Количество ячеек n смесительного устройства по длине аппарата менялось от 18 до 42. Среднее отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет 12%. Максимальное отклонение - 21%.

Средний диаметр полученных капель масла в воде дает только общую усредненную оценку дисперсности, которой недостаточно для полной характеристики полидисперсной системы, поскольку при одном и том же среднем диаметре капли возможны различные варианты распределения диаметров капель по размерам в получаемой смеси. В связи с этим возникает также необходимость по-

лучения зависимости, по которой можно было бы прогнозировать распределение капель по размерам в смеси без постановки достаточно трудоемких экспериментов.

Для этой цели применяют среднеквадратичное отклонение или коэффициент вариации. Последний - более предпочтителен для процессов смешения, так как характеризует относительную меру среднеквадратичного отклонения измеренного значения от среднего значения.

На рис. 6 приведена зависимость коэффициента вариации размеров капель масла в воде от режима движения жидкости в смесителе при различном количестве ячеек смесительного устройства по длине смесителя.

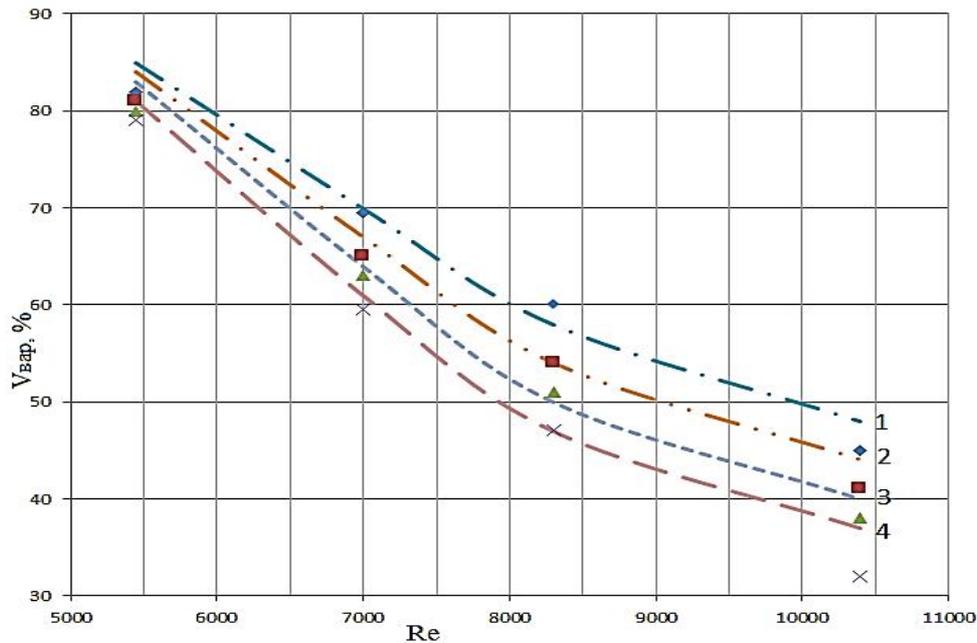


Рис.7. Зависимость коэффициента вариации диаметров капель масла в воде от режима движения жидкости в смесителе при разном количестве ячеек смесительного устройства по длине смесителя

1 - 18 ячеек, 2 - 24 ячеек, 3 - 30 ячеек, 4 - 42 ячейки

При обработке полученных результатов экспериментальных исследований методом наименьших квадратов была получена зависимость качества смешения взаимно нерастворимых жидкостей в статическом смесителе в зависимости от режимов течения жидкой фазы и количества вихревых ячеек по длине аппарата:

$$V_{\text{вар}} = 3,26 \cdot Re^{-0,1} \cdot We^{*-0,04} \cdot (n)^{-0,2}$$
,
где $V_{\text{вар}}$ – коэффициент вариации; n – число ячеек смесительного устройства по длине аппарата;

We^* – приведенный критерий Вебера;

Re – критерий Рейнольдса.

Критерий Re изменялся в пределах 5450÷10400. Количество ячеек n смесительного устройства по длине аппарата менялось от 18 до 42. Среднее отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет 14%. Максимальное отклонение - 24%.

Исследования процесса эмульгирования водно-масляной смеси в статическом смесителе с пакетно-вихревой насадкой в качестве смешивающего устройства показали, что даже при максимальной скорости течения жидкостей немногим большей 1 м/с возможно получить достаточно однородную по размерам капель масла эмульсию.

Показано также, что коэффициент вариации распределения капель по размерам уменьшается, как с увеличением критерия Вебера, так и числа вихревых ячеек по длине насадки.

Предложено качество смешения жидкостей оценивать по значению коэффициента вариации размеров капель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бальмонт Д.С., Гуюмджян П.П., Бальмонт Т.М. Исследование механизмов процесса перемешивания жидких сред // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. Иваново. 2009. №3. С. 65-67.
2. Кадыров Р.Ф., Блиничев В.Н., Чагин О.В., Кадыров Р.Р. «Пакетная вихревая насадка

для тепло- и массообменных аппаратов». Патент РФ №2205063. 2003.

3. Колмогоров, А. Н. О дроблении капель в турбулентном потоке // Доклады АН СССР. 1949. Т. 66. №. 5. С. 825-828.
4. Форст У., Моулден Т. Турбулентность, принципы и применение. М.: Мир, 1980. 535с
5. Повтарев И.А. / И.А.Повтарев, В.Н. Блиничев, О.В. Чагин, Я. Кравчик Я. Исследование гидравлического сопротивления насадочного слоя колонного оборудования // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2006. Т. 49. №12. С. 109-110.
6. Бойко В.М., Поплавский С.В. Физическая модель разрушения капли за ударной волной по срывным механизмам // Международная конференция «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика, посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н.Яненко» (Россия, Новосибирск, 30 мая – 4 июня 2011 г.): Тезисы докладов.. Новосибирск: Академгородок, 2011. С. 114.
7. Штербачек З., Туаск П. Перемешивание в химической промышленности / Пер. с чешского под ред. И.С. Павлушенко. Л.: ГХИ, 1963. 416 с.
8. Abiev R. S., Vasilev M.R. Pulsating flow type apparatus: Energy dissipation rate and droplets dispersion // Chemical Engineering Research & Design. 2016. V. 108. P. 101-108.

Статья публикуется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках реализации проекта №18-03-20102-г.

Рукопись поступила в редакцию 22.10.2018

EXPERIMENTAL STUDY OF OBTAINING THE EMULSION IN THE STATIC MIXER IS OF THE VORTEX TYPE

M. Sivolothkiy, O. Chagin, V. Blinichev, I. Postnikova

The article is devoted to the study of the work of a static vortex-type mixer. When developing the design of a static mixer, special emphasis is placed on the design of internal mixing elements that determine the main parameters of the mixer: the quality of mixing and its hydraulic resistance. The mechanism of crushing of drops of oil in water is described under turbulent flow of mixing fluids in the mixer. The results of the study of the quality of the obtained emulsion water-oil in a static mixer are presented. Researches of process of the emulsification of the water-oil mixture in a static mixer with a batch-vortex nozzle as a mixing device have shown, what even at the maximum speed of a current of liquids probably to receive sufficiently homogeneous emulsion for the size of drops of oil. It was found, that the coefficient of variation of droplet size distribution decreases with increasing Weber criterion and the number of vortex cells along the length of the nozzle. It is proposed to evaluate the quality of mixing of liquids by the value of the coefficient of variation of droplet sizes.

Key words: static mixer, mixing quality, mixing element, mixing element cell, coefficient of variation, Weber criterion.

References

1. Bal'mont D.S., Guyumdzhan P.P., Bal'mont T.M. Issledovanie mekhanizmov processa peremeshivaniya zhidkih sred. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie. Ivanovo. 2009. №3. S. 65-67.
2. Kadyrov R.F., Blinichev V.N., CHagin O.V., Kadyrov R.R. «Paketnaya vihrevaya nasadka dlya teplo- i massoobmennykh apparatov». Patent RF №2205063. 2003.
3. Kolmogorov, A. N. O droblenii kapel' v turbulentnom potoke // Doklady AN SSSR. 1949. T. 66. №. 5. S. 825-828.
4. Forst U., Moulden T. Turbulentnost', principy i primeneniye. M.: Mir, 1980. 535s.
5. Povtarev I.A. / I.A.Povtarev, V.N. Blinichev, O.V. CHagin, YA. Kravchik YA. Issledovanie gidravlicheskogo soprotivleniya nasadochnogo sloya kolonnogo oborudovaniya // Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2006. T. 49. №12. S. 109-110.
6. Bojko V.M., Poplavskij S.V. Fizicheskaya model' razrusheniya kapli za udarnoj volnoj po sryvnyam mekhanizamam. Mezhdunarodnaya konferenciya «Sovremennye problemy prikladnoj matematiki i mekhaniki: teoriya, ehksperiment i praktika, posvyashchennaya 90-letiyu so dnya rozhdeniya akademika N.N.YAnenko» (Rossiya, Novosibirsk, 30 maya – 4 iyunya 2011 g.): Tezisy .dokladov. Novosibirsk: Akademgorodok, 2011. S. 114.
7. SHterbachek Z., Tuask P. Peremeshivaniye v himicheskoy promyshlennosti. Per. s cheshskogo pod red. I.S. Pavlushenko. L.: GHI, 1963. 416 c.
8. Abiev R. S., Vasilev M.R. Pulsating flow type apparatus: Energy dissipation rate and droplets dispersion. Chemical Engineering Research & Design. 2016. V. 108. P. 101-108.