

УДК 628.543

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ВИХРЕВЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СМЕСИТЕЛЯХ

Е. А. Урецкий¹, А. П. Дарманиян², В. В. Мороз³

¹Начальник научно-исследовательской лаборатории, Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный проектный институт», Витебск, Беларусь, e-mail: euretsky@yandex.by

²Д. т. н., профессор кафедры Электрооборудования и электрохозяйства предприятий АПК ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», Волгоград, Россия, e-mail: adarma@inbox.ru

³К. т. н., доцент, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vovavall@mail.ru

Реферат

Проведены исследования эффективности работы вихревого центробежного смесителя, предназначенного для смешения реагентов со сточными водами, и на их основании разработан малозатратный ресурсосберегающий вихревой смеситель для предварительного смешения реагентов со сточными водами защищённый а. с. на изобретение. Установлено, что такой смеситель обеспечивает предварительное смешение реагентов со сточными водами со степенью сегрегации до 90 %. При этом совокупность стадий перемешивания сточных вод и реагентов при их широком спектре расходов, практически приближается к идеальному смесителю.

Ключевые слова: вихревой смеситель, химический реактор, механические мешалки, pH, гидродинамика, структура потоков, микроперемешивание, реагенты.

STUDY OF THE EFFICIENCY OF MIXING LIQUIDS IN VORTEX CENTRIFUGAL MIXERS

E. A. Uretsky, A. P. Darmanyanyan, V. V. Moroz

Abstract

The efficiency of operation of a vortex centrifugal mixer designed for mixing reagents with wastewater has been studied, and on their basis, a low-cost resource-saving vortex mixer for preliminary mixing of reagents with wastewater protected by an a.s. has been developed for an invention. It has been established that such a mixer provides preliminary mixing of reagents with wastewater with a degree of segregation of up to 90 %. At the same time, the set of stages of mixing wastewater and reagents, with their wide range of costs, practically approaches the ideal mixer.

Keywords: vortex mixer, chemical reactor, mechanical stirrers, pH, hydrodynamics, flow structure, micromixing, reagents.

Введение

Перемешивание – одна из технологических операций, широко применяемых в химической промышленности для осуществления различных физических процессов и служащая для выравнивания полей концентраций и температур, и зачастую определяющая скорость протекания этих процессов, поскольку в этом случае оказывает влияние не только на скорость процесса, но и на качество очистки. Для расчета химических реакторов наряду с данными по кинетике химических процессов необходимо знать уровень смешения реагентов, а также состояние потоков реагентов, подаваемых в аппарат.

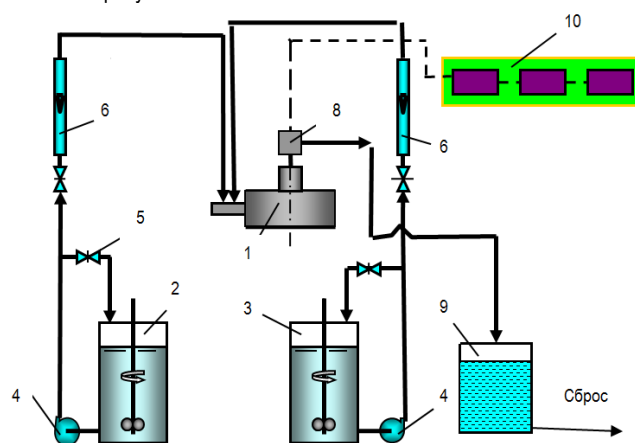
В химической промышленности и в частности при очистке сточных вод широко используют аппараты с механическими мешалками [1, 2, 3, 4].

Состояния предварительной смешанности можно добиться в таких аппаратах с помощью специальных мер [5, 10], но при этом необходимо обеспечить высокие скорости вращения мешалки, что приводит к значительному усложнению конструкции. В связи с этим, важное значение приобретают малые по объёму смесители, в которых для перемешивания реагентов используется кинетическая энергия потоков. Эти смесители применяются в химической промышленности для осуществления процессов перемешивания в различных системах (жидкость-жидкость, жидкость-газ, жидкость-твёрдое тело).

Основная часть. Исследование эффективности перемешивания и расчет статических смесителей

Широкое использование статических смесителей в промышленности ограничено из-за отсутствия методических материалов по их расчёту. Теоретическое описание перемешивания реагентов представляет значительные трудности, а систематических экспериментальных исследований пока недостаточно.

Поэтому на базовом предприятии ОАО «Брестский электромеханический завод» (ОАО «БЭМЗ») для проведения исследований по работе статических смесителей была смонтирована установка, показанная на рисунке 1.



- 1 – статический смеситель; 2, 3 – ёмкости для реагентов; 4 – насосы;
- 5 – вентили; 6 – ротаметры; 7 – смеситель;
- 8 – кондуктометрическая ячейка; 9 – сборная ёмкость;
- 10 – измерительная система;
- 9 – система для замера электропроводности

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки (а. с. на изобретение № 160616)

Установка состояла из статического смесителя непрерывного действия 1, в который из ёмкостей 1 и 2 с помощью насоса 4 подавались растворы реагентов (едкого натрия и ацетилацетата). Расход реагентов регулировался с помощью вентиля 4 и регистрировался с ротаметрами 6. Растворы реагентов поступали в смеситель, перемешивались и вступали в химическое взаимодействие, а затем проходили кондуктометрическую ячейку 8 и поступали в сборную ёмкость 9, из которой периодически сливались. Электропроводность смеси, а вместе с ней и степень превращения реагентов регистрировалась с помощью измерительной системы 10.

Для проведения экспериментов был сконструирован смеситель объёмом 110 см³, показанный на рисунке 2. Он состоял из цилиндрического корпуса диаметром 64 мм, закрытого с обеих сторон крышками и снабжённым тангенциальным патрубком и двумя штуцерами для подвода перемешивающихся жидкостей.

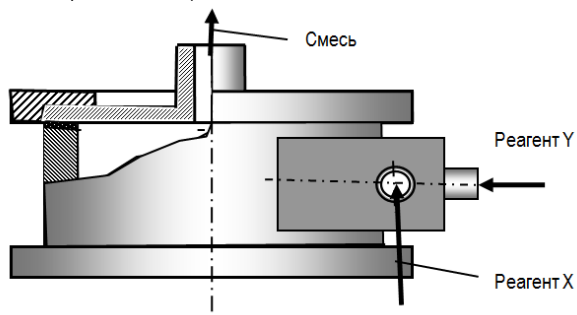


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки вихревого центробежного смесителя

Для вывода смеси использовался осевой отводящий патрубок. Перемешивание реагентов в статическом смесителе осуществлялось за счёт турбулизации потока во всём объёме смесителя.

Эффективность перемешивания в этом смесителе оценивалась как с точки зрения модели структуры потоков (кривых РВП-распределения времени пребывания), так и с точки зрения перемешивания химических реагентов на молекулярном уровне, т. е. микроперемешивания кривых на макро-, так и на молекулярном уровне, т. е. микроперемешивания.

Кривые РВП в виде кривых отклика на импульсное возмущение индикатором, в качестве которого был выбран KCl, регистрировались с помощью кондуктометрической ячейки.

Анализ полученных кривых отклика показал, что в широком интервале значений расхода жидкости 0,15–0,59 л/мин, что соответствует времени пребывания $\tau = 11 \pm 43$ с, модель структуры потоков центробежного смесителя отвечает модели идеального перемешивания.

Для оценки эффективности перемешивания в данном устройстве с точки зрения эффективности перемешивания использовался метод модельной химической реакции, применяемой для изучения аппаратов с мешалками и детально описанной в работе [9].

Согласно этому методу на вход в смеситель подавались два потока химических реагентов с известной кинетикой реакции, а на выходе из смесителя измерялась степень превращения вещества. Полученные значения сравнивались с максимально возможной величиной превращения вещества, которое имеет место в том случае, когда входящие потоки смешиваются на входе в устройство и не теряют свою индивидуальность вплоть до выхода из устройства, т. е. в состоянии полной сегрегации предварительно смешанных потоков. Всякое снижение степени смешения вещества ниже максимального свидетельствует о неполном смешивании входящих потоков жидкости, т. е. как раз о перемешивании на микроуровне.

В настоящем исследовании в качестве модельной реакции для исследования процесса микроперемешивания реагентов использовалась известная и хорошо изученная реакция омыления ацетата имеющая достаточную скорость уже при комнатной температуре, что позволило создать идеальные изотермические условия. Проведение этой реакции в вихревом центробежном смесителе при различных расходах реагентов позволило получить зависимость степени превращения вещества X % от критерия Дамкеллера $Da = KC_0T$, которая приведена на рисунке 3.

При изучении микроперемешивания использовали следующую методику: в ёмкости заливали растворы реагентов с требуемой начальной концентрацией, затем тарировали ротаметры по каждому потоку, после чего подавали оба реагента через смеситель.

На выходе через определённые интервалы времени брали пробы реакционной массы. Реакция в пробе останавливалась раствором щавелевой кислоты, избыток которой потом оттитровывался раствором щёлочи на приборе ЭВ-74. При этом каждый эксперимент повторялся 2 - 3 раза, а расчёт степени превращения вещества X_v осуществлялся как среднее в нескольких (трёх-четырёх) параллельных опытах, что позволило достигнуть точности

0,5 - 1,0 % по X_v.

В опытах варьировались начальные и конечные концентрации реагентов, расходы и соотношения реагентов, скорости истечения реагентов из сопел, температура смеси.

При любых технологических условиях соблюдалось требование, что средние значения концентраций реагентов по всему объёму смесителя равны между собой $C_{A0} = C_{B0}$. Степень превращения веществ X_v по результатам титрования вычислялась по формуле

$$X_v = 1 - \frac{C_{Bv}}{C_{B0}} = 1 - \frac{2n \cdot V_r \cdot C_r - V_m \cdot C_m}{C_{Bj} \cdot n \cdot V_{пр}}$$

где V_{пр} - объём пробы после добавления в щавелевую кислоту реакционной массы;

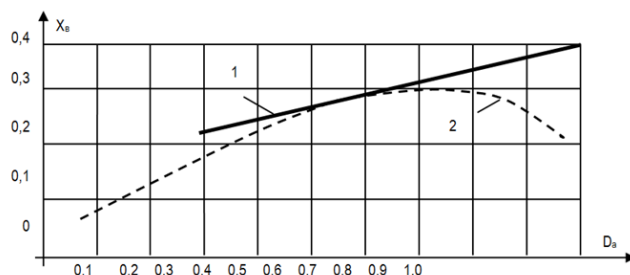
V_r - объём раствора, отбираемого на анализ;

V_t - объём раствора щёлочи, пошедшей на титрование;

Ст - концентрация раствора щёлочи, применяемая для титрования;

Сг - концентрация щавелевой кислоты, применяемой для остановки реакции в пробе;

n - доля объёма пробы, взятой на титрование.



1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальные значения, полученные при следующих условиях эксперимента: начальная концентрация реагентов $C_0 = 0,2$ моль/л, константа скорости химической реакции $K = 0,125$ моль/л · с при $T = 26$ °C, время пребывания $\tau = 11 \pm 43$ с

Рисунок 3 – Зависимость степени превращения вещества X_v, % от критерия Дамкеллера

На этом же рисунке приведена зависимость X от Da для крайнего состояния полной сегрегации предварительно смешанных потоков. Как видно из рисунка 3, при малых значениях Da меньше или равно 0,5 (малых τ , что то же самое, больших расходах жидкости) превращение вещества соответствует максимально возможному. Это свидетельствует о том, что на входе в смеситель произошло смешение реагентов на молекулярном уровне.

При уменьшении расхода жидкости, когда $Da > 0,5$, превращение вещества снижается и становится ниже максимального значения. Это свидетельствует о том, что в смесителе часть объёма занята непроперемешанными реагентами, или как согласно [5, 9] часть входящих потоков в течение некоторого времени остаётся сегрегированной. Таким образом, несмотря на то, что модель структуры потоков исследуемого смесителя отвечает модели идеального перемешивания, качество смешения реагентов зависит от расхода жидкости, т. е. от энергии входящих потоков. Поэтому при расчёте и проектировании таких устройств необходимо определять область их эффективной работы с точки зрения микроперемешивания.

Эффективность работы химических реакторов в значительной мере зависит от того, в каком состоянии подаются в аппарат потоки реагентов [5, 6] – предварительно смешанными или предварительно не смешанными.

Состояние предварительной смешанности гарантирует высокую степень превращения. Такое состояние входных потоков можно обеспечить различными методами: подачей реагентов в зону интенсивного перемешивания на края лопастей мешалки [7, 8, 9] либо использованием перед реакторами статических смесителей различной конструкции [7, 8, 9].

Схемы статических смесителей представлены на рисунке 4.

Перемешивание реагентов в статическом смесителе осуществляется за счет кинетической энергии потоков поступающих в смеситель реагентов. Объем смесительной камеры:

$$V = \tau (q_{v1} + q_{v2})$$

где: τ – время пребывания в смесительной камере 20 – 30 с.

Время пребывания, необходимое для обеспечения смешения

потоков [5, 6]:

$$\tau = \frac{0.5}{k \cdot C_0}$$

Сечение сопла, необходимое для обеспечения смешения потоков, по которому подается поток, обладающий более высокой скоростью:

$$f_1 = \frac{q_{v1}}{V_1},$$

$$V_1 \leq (2 - 4) \text{ м/с}$$

соотношение скоростей: $\frac{V_1}{V_2} \geq 5$ [9]

сечение сопла, по которому поступает медленный поток:

$$f_2 = \frac{q_{v2}}{V_2}$$

сечение выходного патрубка:

$$f_3 = \frac{q_{v1} + q_{v2}}{V_3}$$

скорость движения жидкости в выходном патрубке: $V_3 \leq 1.0 \text{ м/с}$

Соотношения геометрических размеров даны на рисунке 4.

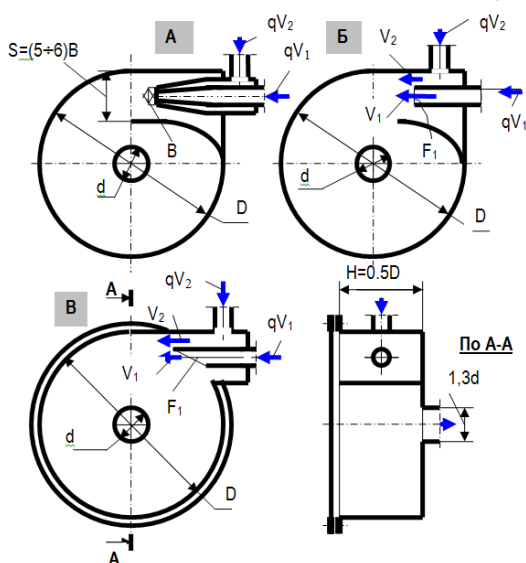


Рисунок 4 – Конструктивные схемы смесителей

В своё время авторами статьи в содружестве с сотрудниками кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» ФГБОУ ВО «Волгоградский ГАУ» д.т.н. Дарманяном и д.т.н. Тишиным была

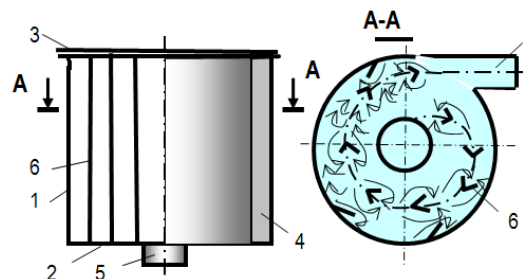
проделана работа для изучения режимов работы статического смесителя, совместно с которыми была создана соответствующая конструкция, защищённая а.с. № 1606167 [10] на изобретение, приведенная на рисунке 5.

Заключение

1. Для обеспечения эффективной работы смесителей необходимо обеспечить следующие условия: $D_a = 0.4$; $\Delta = 4 - 5$.

2. Использование статических смесителей предложенной конструкции позволит интенсифицировать процессы перемешивания химических реагентов.

3. Полученные данные можно использовать при проектном расчёте статических смесителей.



1 – цилиндрический корпус; 2 – крышка; 3 – тангенциальный патрубок; 4 – входной патрубок; 5 – выходной патрубок; 6 – турбулизаторы

Рисунок 5 – Вихревой смеситель (а.с. № 1606167 на изобретение.)

Использование таких смесителей резко уменьшает объем основного реактора, а в отдельных случаях позволяет обойтись и без него.

Эксперименты показали, что в широком диапазоне изменения расходов структура потоков соответствует модели идеального перемешивания и лишь при незначительных расходах происходит трансформация модели идеального перемешивания в диффузионную модель. Было также выяснено, что, несмотря на малое время пребывания реакционной массы в смесителе (от 8 до 40 с), степень превращения вещества соответствует расчетной.

Таким образом, статические смесители при больших расходах, создающих высокую турбулентность, позволяют обеспечить время перемешивания менее двух секунд и устойчивое функционирование систем очистки промышленных сточных вод. Такие устройства позволяют на входе в основную зону аппарата с мешалкой иметь один поток с перемешанной на молекулярном уровне смеси. Это исключает проскики не прореагировавших веществ на выходе из аппарата, обеспечивает сокращение времени пребывания сточных вод в аппарате за счет высокой скорости химических процессов в состоянии полной сегрегации.

Экспериментальные исследования по микроперемешиванию показали, что превращение вещества, соответствующее полной сегрегации, может быть достигнуто в аппаратах с мешалками при подаче реагентов и сточных вод в зону интенсивного перемешивания (на края лопастей). Или в комбинированном аппарате, состоящем из последовательно соединенного статического смесителя и типового аппарата с перемешивающим устройством. В качестве аппаратного оформления процесса реагентной очистки могут быть приняты оба варианта.

Расчет производительности аппарата заключается в определении времени пребывания химических реагентов, обеспечивающего заданное превращение вещества. Как известно, степень превращения вещества зависит от скорости химических реакций, модели структуры потоков и от качества смешения реагентов на молекулярном уровне. В состоянии полной сегрегации, когда потоки химических реагентов и обрабатываемых сточных вод смешиваются на входе в аппарат и остаются сегрегированными до выхода, долю не прореагировавшего вещества можно определить по формуле:

$$\frac{C_e}{C_0} = \int_0^{\infty} \left(\frac{C_e}{C_0}\right)_{\text{пер}} * dF$$

где $\frac{C_e}{C_0}$ - кинетическая зависимость, полученная в аппарате периодического действия,

dF - функция распределения времени пребывания, полученная при изучении реакции системы на ступенчатое или импульсное возмущение.

Интерпретация данного выражения в графической форме позволяет определить необходимое значение (C_e/C_0) . Учитывая ранее полученные данные о микроперемешивании, можно считать, что при предварительной гомогенизации потоков в устройствах различных типов в аппарате имеет место состояние полной сегрегации.

Для любого значения pH среды можно рассчитать необходимое время пребывания смеси, а производительность аппарата определить по формуле:

$$q_v = \frac{V \cdot \varphi}{\tau}$$

где: φ - коэффициент заполнения аппарата,

V - номинальный объем аппарата.

Таким образом, можно определять производительность реакторной части установки для любого pH среды и выбранного объема аппарата.

Расчеты, произведенные на компьютерах по специально составленным программам, показали, что в стандартных аппаратах с перемешивающими устройствами при незначительных доработках по рекомендациям авторов можно резко интенсифицировать процессы обезвреживания промышленных сточных вод. При этом сокращение времени пребывания обрабатываемых сточных вод достигает 8 - 10 раз меньше чем установлено СНИПом и ТУ.

Список цитированных источников

1. Degremont. Справочник по обработке воды: в 2-х т. пер. с фр. – СПб.: Новый журнал, 2007. – 1696 с.
2. Очистка промышленных сточных вод: пер. с нем. – СПб.: Новый журнал, 2012. – 384 с.
3. Справочник по современным методам и технологиям очистки природных и сточных вод и оборудованию / ДАНСЭЕ, отдел по Восточной Европе. – Копенгаген, 2001. – 253 с.
4. Новый справочник химика. Ч II. – СПб.: НПО. «Профессионал». Процессы и аппараты химических технологий. МММ. – 2006. – 916 с.
5. Исследование эффективности перемешивания жидкосткостей в вихревых центробежных смесителях / С.И. Романов [и др.] // Сб. науч. трудов ВолгПИ. – Волгоград, 1986. – 136 с.

6. Использование статических смесителей для интенсификации процесса перемешивания жидких сред / А.И. Дарманян [и др.] // Тезисы докладов Всесоюзного совещания «Повышение эффективности и надёжности машин и аппаратов в основной химии». – Сумы, 1988.
7. Урецкий Е.А. Ресурсосберегающие технологии в водном хозяйстве промышленных предприятий : монография / Е.А. Урецкий. – Брест : БГТУ, 2007. – 396 с.
8. Урецкий, Е.А. Ресурсосберегающие технологии промышленного водоснабжения и водоотведения : монография / Е.А. Урецкий. – Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 360 с.
9. Урецкий, Е.А. Оптимизация существующих и разработка новых ресурсосберегающих технологий в водном хозяйстве предприятий приборо- и машиностроения : монография / Е.А. Урецкий, Е.С. Гоги-на, В.В. Мороз. – М. : АСВ, 2022. – 620 с.
10. А.с. 1606167 СССР В 01 F 5/00, В 04 С 3/00 ВПИ Вихревой аппарат / Е.А. Урецкий, Б.А. Митин, С.Н. Романов, О.А. Тишин, А.П. Дарманян, Н.В. Тябин. – 4 с.

References

1. Degremont. Spravochnik po obrabotke vody: v 2-h t. per. s fr. – SPb.: Novyj zhurnal, 2007. – 1696 s.
2. Ochistka promyshlennyh stochnyh vod: per. s nem. – SPb.: Novyj zhurnal, 2012. – 384 s.
3. Spravochnik po sovremennym metodam i tekhnologiyam ochistki prirodnyh i stochnyh vod i oborudovaniyu / DANSEE, otдел po Vostochnoj Evrope. – Kopenhagen, 2001. – 253 s.
4. Novyj spravochnik himika. CH II. – SPb.: NPO. «Professional». Processy i apparaty himicheskikh tekhnologij. МММ. – 2006. – 916 s.
5. Issledovanie effektivnosti peremeshivaniya zhidkostkостей v vihrevykh centrobeznyh smesitelyah / S.I. Romanov [i dr.] // Sb. nauch. trudov VolgPI. – Volgograd, 1986. – 136 s.
6. Ispol'zovanie staticheskikh smesitelej dlya intensivatsii processa peremeshivaniya zhidkikh sred / A.I. Darmanyan [i dr.] // Tezisy dokladov Vsesoyuznogo soveshchaniya «Povyshenie effektivnosti i nadyozhnosti mashin i apparatov v osnovnoj himii». – Sumy, 1988.
7. Ureckij, E.A. Resursosberegayushchie tekhnologii v vodnom hozyajstve promyshlennyh predpriyatij : monografiya / E.A. Ureckij. – Brest : BGTU, 2007. – 396 s.
8. Ureckij, E.A. Resursosberegayushchie tekhnologii promyshlennogo vodosnabzheniya i vodootvedeniya : monografiya / E.A. Ureckij. – Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 360 s.
9. Ureckij, E.A. Optimizatsiya sushchestvuyushchih i razrabotka novyh resursosberegayushchih tekhnologij v vodnom hozyajstve predpriyatij priboro- i mashinostroeniya : monografiya / E.A. Ureckij, E.S. Gogina, V.V. Moroz. – M. : ASV, 2022. – 620 s.
10. A.s. 1606167 SSSR V 01 F 5/00, V 04 S 3/00 VPI Vihrevoj apparat / E.A. Ureckij, B.A. Mitin, S.N. Romanov, O.A. Tishin, A.P. Darmanyan, N.V. Tyabin. – 4 s.

Материал поступил 10.01.2023, одобрен 20.02.2023, принят к публикации 29.03.2023