



Научная статья
2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК666.9.022.3

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.026

 EDN: [ESZHUG](https://elibrary.ru/ESZHUG)

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СУСПЕНЗИИ ПРИ ЕЁ ОБРАБОТКЕ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

Михаил Степанович Василишин ¹, Олег Сергеевич Иванов ²,
Анатолий Геннадьевич Карпов ³, Александра Александровна Антонникова ⁴

^{1, 2, 3, 4} Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия
osi85@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования повышения температуры модельных водных суспензий гексахлорэтана (ГХЭ) при их обработке в установке с многоцилиндровым роторно-пульсационным аппаратом (РПА). Приводится описание лабораторной установки, РПА и методики проведения исследований по оценке нагрева 1 и 4%-ных водных суспензий ГХЭ при их гидромеханической обработке. Для двух значений чисел оборотов ротора РПА (33,3 и 45,8с⁻¹), а также для двух значений радиального зазора между цилиндрами ротора и статора (0,1·10⁻³ и 1·10⁻³м) получены экспериментальные данные по увеличению температуры модельных суспензий. В предположении, что вся подводимая к обрабатываемой среде механическая энергия переходит в тепловую и теплообмен с окружающей средой отсутствует, выполнена расчётная оценка нагрева суспензии. Показано, что при увеличении числа оборотов ротора РПА и концентрации суспензии, темп её нагрева возрастает. Уменьшение величины радиального зазора между цилиндрами ротора и статора способствует значительному разогреву суспензии. Отмечена удовлетворительная сходимость расчётных и экспериментальных данных по нагреву суспензий. Полученные сведения могут быть полезными при проектировании оборудования для обработки систем «жидкость–твёрдое».

Ключевые слова: роторно-пульсационный аппарат, нагрев суспензии при обработке, оценка влияния режимов измельчения.

Для цитирования: К вопросу повышения температуры суспензии при её обработке в роторно-пульсационном аппарате / М. С. Василишин [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 1, С. 209–213. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.026. EDN: <https://elibrary.ru/ESZHUG>.

Original article

TO A QUASTION OF AN INCREASE OF SUSPENSION TEMPERATURE AT IT'S PROCESSING IN ROTOR-STATOR SYSTEM

Mikhail S. Vasilishin ¹, Oleg S. Ivanov ², Anatoly G. Karpov ³,
Alexandra A. Antonnikova ⁴

^{1, 2, 3, 4} Institute for Problems Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia
osi85@mail.ru

Abstract. Results of an experimental research of a temperature increase of model water suspensions of hexachlorineethane (HCE) at their processing in setup with multicylinder rotor-stator system (RSS) are presented. The laboratory-scale setup description, RSS and conducting techniques of researches according to heating 1 and 4% water suspensions of HCE is resulted at their hydromechanical processing. For two values of corrected speeds of RSS rotor (33,3 and 45,8s⁻¹), and also for two values of a radial clearance between rotor and stator cylinders (0,1·10⁻³ and 1·10⁻³m) experimental data on increase in temperature of modeling suspensions are gained. In the assumption, that all mechanical energy brought to the processed medium passes in thermal and heat exchange with a cir-

cumambient is absent, the settlement estimation of suspension heating is executed. It is shown, that at increase in a corrected speed of RSS rotor and concentration of suspension, rate of its heating increases. Decrease of magnitude of a radial clearance between rotor and stator cylinders promotes a considerable warming up of suspension. Satisfactory convergence settlement and experimental data on heating of suspensions is noted. The gained data can be useful at designing of the equipment for processing of systems "liquid-solid".

Keywords: rotor-stator system, suspension heating at processing, estimation of agency of grinding regimes.

For citation: Vasilishin, M.S., Ivanov, O.S., Karpov, A.G. & Antonnikova, A.A. (2024). To a question of an increase of suspension temperature at it's processing in rotor-stator system. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 209-213. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.01.026. EDN: <https://elibrary.ru/ESZHUG>.

ВВЕДЕНИЕ

Роторно-пульсационные аппараты (РПА) являются многофункциональным видом технологической аппаратуры, используемой для интенсификации большого числа гидромеханических и массообменных процессов в различных отраслях промышленности. В основу работы такого оборудования положен принцип многократной циркуляции обрабатываемой жидкой среды через гидродинамически активные зоны аппарата. При этом движение может быть организовано как по внутренней схеме, когда погружной РПА устанавливается непосредственно в ёмкости с обрабатываемой средой, так и по внешней, когда проточный аппарат встраивается в выносной циркуляционный контур установки. Схема с внешней циркуляцией характеризуется повышенной технологической эффективностью и широко применяется, например, в пищевых и фармацевтических производствах для получения стойких эмульсий, тонкого измельчения твёрдых веществ и в других целях [1–3].

Типовой проточный РПА состоит из быстровращающегося ротора и статора, размещённых в корпусе и выполненных в виде коаксиальных цилиндров, имеющих радиальные щелевые каналы (прорези) для прохода обрабатываемой среды. Цилиндры ротора и статора образуют между собой один или несколько радиальных зазоров, величина которых в значительной степени влияет на эффективность проводимых в аппарате технологических процессов.

В рабочей камере аппарата со стороны его рабочих органов реализуется комплекс мощных энергетических воздействий на обрабатываемую среду. В результате в ней возникают колебания широкого диапазона частот, знакопеременное давление, сочетающиеся с механическим воздействием на частицы дисперсной фазы и вызывающие их измельчение.

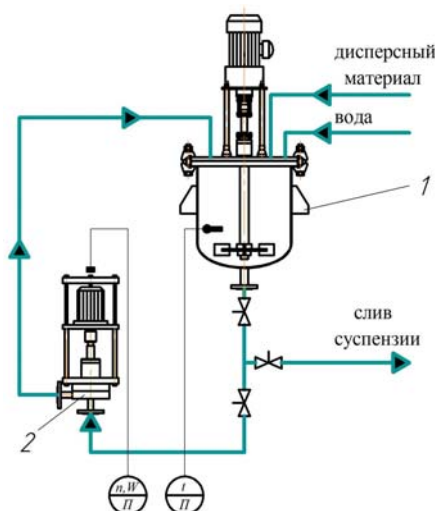
В ряде работ [4, 5] отмечается, что диссипация подводимой энергии происходит

преимущественно в радиальных зазорах между цилиндрами ротора и статора РПА, величина которых в промышленных образцах находится в пределах $\delta = (0,1-1,0) \cdot 10^{-3}$ м. При этом в обрабатываемой жидкой среде возникают значительные сдвиговые напряжения, вызывающие её нагрев. Сообщается [6], что повышение температуры может составлять десятки градусов и оказывать отрицательное влияние на ход технологических процессов и их безопасность.

Тонкое измельчение некоторых твёрдых дисперсных материалов [7–9] можно проводить с использованием РПА. В этой связи вопрос нагрева суспензии при её обработке становится чрезвычайно важным.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Целью настоящей работы является экспериментальная и теоретическая оценки нагрева водной суспензии дисперсного материала при обработке в многоцилиндровом РПА.



1 – аппарат с турбинным перемешивающим устройством; 2 – роторно-пульсационный аппарат

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Figure 1 – Diagram of the experimental installation

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СУСПЕНЗИИ ПРИ ЕЁ ОБРАБОТКЕ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

Эксперименты по оценке величины нагрева суспензии проводили на установке, схема которой показана на рисунке 1.

В состав установки входит аппарат 1 с турбинным перемешивающим устройством и РПА 2, соединённые друг с другом трубопроводами, образующими единый циркуляционный контур. С целью минимизации тепловых потерь в окружающую среду аппарат 1 и трубопроводы теплоизолированы.

Установка укомплектована запорной арматурой и приборами контроля параметров процесса. Регулирование числа оборотов ротора РПА проводили частотным преобразователем ВЕСПЕР. Температуру суспензии в аппарате 1 контролировали термометром с ценой деления 0,1 °С.

В экспериментах использовался лабораторный многоцилиндровый РПА проточного типа, выполненный по схеме с вертикальным валом. Конструкция и основные технические характеристики аппарата представлены в [10]. На рис. 2 а, б показаны внешний вид лабораторного РПА (крышка снята) и сменный ротор аппарата.



а



б

Рисунок 2 – Устройство роторно-пульсационного аппарата

Figure 2 – The device of the rotary pulsating apparatus

В качестве дисперсной фазы суспензии использовался гексахлорэтан (ГХЭ), выпускаемый по ГОСТ 9991-74. Удельная площадь поверхности частиц исходного продукта, измеренная при помощи оптического анализатора размеров частиц РИР 9.1, составляла $S_{уд} = 0,1 \text{ м}^2/\text{см}^3$. Сплошной фазой являлась дистиллированная вода. Модельные суспензии готовили из расчёта 0,05 и 0,2 кг ГХЭ на $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ воды. Эксперименты проводили при числе оборотов ротора РПА $n = 33,3$ и $45,8 \text{ с}^{-1}$, при этом число оборотов вала турбинной мешалки в аппарате 1 составляло $n_d = 5,8 \text{ с}^{-1}$. Использовались сменные роторы, обеспечивающие два значения радиального зазора $\delta = 0,1 \cdot 10^{-3}$ и $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Навеску исходного ГХЭ загружали в аппарат 1, после чего в течение времени $t = 3600 \text{ с}$ проводилась обработка суспензии, циркулирующей через РПА 2. В ходе опытов фиксировали величину нагрева суспензии $\Delta\Theta$.

Наряду с экспериментальным определением $\Delta\Theta$ выполнена её расчётная оценка. Полагали, что вся подводимая к обрабатываемой системе механическая энергия диссипирует в тепловую, а теплообмен с окружающей средой отсутствует.

Время пребывания суспензии в единичном радиальном зазоре аппарата определяли по зависимости [1]:

$$t_3 = \pi \cdot D \cdot \delta \cdot b_1 / Q, \quad (1)$$

где D – средний диаметр единичного кольцевого зазора пары «ротор–статор», м; b_1 – высота цилиндра ротора, м; Q – объёмный расход обрабатываемой среды, $\text{м}^3/\text{с}$.

Величина Q определялась экспериментально при тарировке расхода суспензии через РПА. Значение b_1 для лабораторного образца составляло 0,008 м.

Повышение температуры обрабатываемой среды оценивали по зависимости [1, 11]:

$$\Delta\Theta = \mu \cdot (V_0 / \delta)^2 \cdot t_3 / (\rho_c \cdot c_p), \quad (2)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; V_0 – окружная скорость единичного цилиндра ротора РПА, м/с; ρ_c – плотность обрабатываемой среды, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_p – теплоёмкость среды, Дж/кг·К.

Результаты экспериментальной и расчётной оценок нагрева модельных систем при их обработке в многоцилиндровом РПА представлены в таблице 1.

Анализ полученных данных показывает, что при обработке модельных водных суспензий ГХЭ увеличение числа оборотов ротора РПА вызывает повышение температуры обрабатываемой среды. Следует отметить, что для устройств, имеющих различную ве-

личину радиального зазора, изменение температуры отличается.

В случае обработки 1%-ной суспензии и использовании РПА с зазором $\delta = 1 \cdot 10^{-3}$ м, при увеличении числа оборотов ротора разница в величинах нагрева среды составляет 0,3 °С. Увеличение концентрации суспензии в 4 раза способствует её повышению до 0,6 °С, что объясняется более высокой вязкостью суспензии и возрастанием потерь на трение в потоке.

Для РПА с зазором $\delta = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м диссипация подводимой энергии более значительна. Так, при обработке 1%-ной суспензии в

том же диапазоне чисел оборотов ротора, разница в величинах нагрева среды составляет уже 4,7 °С, а в случае использования 4%-ной суспензии она увеличивается до 8,7 °С.

Необходимо отметить и значительное возрастание абсолютных значений $\Delta\theta$ при обработке модельных сред в РПА с зазором $\delta = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м. Повышенное тепловыделение в этом случае объясняется большими значениями скоростей сдвига, развиваемыми в зазоре и достигающими значений $(9,5-12,0) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, что сравнимо со скоростями сдвига, характерными для коллоидных мельниц [12].

Таблица 1 – Влияние режима обработки, конструктивных особенностей РПА и характеристик суспензии на температурные показатели процесса измельчения

Table 1 – Influence of the processing mode, design features of the RPA and the characteristics of the suspension on the temperature parameters of the grinding process

Число оборотов ротора $n, \text{с}^{-1}$	Радиальный зазор $\delta \cdot 10^3, \text{м}$	Вязкость суспензии $\mu \cdot 10^3, \text{Па} \cdot \text{с}$	Расход суспензии $Q \cdot 10^6, \text{м}^3/\text{с}$	Время пребывания в зазоре $t_z \cdot 10^2, \text{с}$		Повышение температуры суспензии $\Delta\theta, \text{°С}$	
				расч.	расч.	расч.	эксп.
Суспензия ГХЭ – вода, конц. 1% масс.							
33,3	1,0	1,186	340,0	2,1	1,2	0,9	
45,8			475,0	1,5	1,5	1,2	
33,3	1,0	1,910	330,0	2,1	1,9	1,5	
45,8			465,0	1,5	2,5	2,1	
Суспензия ГХЭ – вода, конц. 4% масс.							
33,3	0,1	1,186	255,0	0,3	15,1	12,9	
45,8			350,0	0,2	20,7	17,6	
33,3	0,1	1,910	245,0	0,3	25,0	20,6	
45,8			340,0	0,2	34,1	29,3	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, обработка суспензий в РПА связана с их нагревом, что вызывает необходимость применения дополнительных устройств, обеспечивающих гарантированный отвод тепла из рабочей камеры аппарата.

Расчётные значения $\Delta\theta$, полученные с использованием зависимостей (1) и (2), с достаточной для инженерных расчётов точностью описывают экспериментальные данные. Некоторое завышение расчётных значений над экспериментальными объясняется тем, что часть выделяющейся в процессе обработки тепловой энергии отводится в окружающую среду через корпус РПА, который в лабораторной установке не полностью теплоизолирован.

Полученная информация может быть полезна при проектировании технологий обработки систем «жидкость–твёрдое» с использованием аппаратуры роторно-пульсационного типа.

Работа выполнена с использованием оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балабудкин М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. М. : Медицина, 1983.
2. Промтов М.А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества. М. : Машиностроение, 2004.
3. Балабышко А.М., Зимин А.И., Ружичкий В.П. Гидромеханическое диспергирование. М. : Наука, 1998.
4. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках. Киев : Наукова думка, 2001.
5. Басок Б.И., Накорчевский А.И., Рыжкова Т.С., Пироженко И.А. Экспериментальные исследования гидравлических и тепловых характеристик потока в роторно-пульсационных аппаратах //

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СУСПЕНЗИИ
ПРИ ЕЁ ОБРАБОТКЕ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

Промышленная теплотехника. 2001. Т. 23. № 6. С. 73–76.

6. Ходыркер М.М., Кремнев В.О. Повышение эффективности и надёжности работы роторно-пульсационного аппарата путём охлаждения статора // Промышленная теплотехника. 1984. Т. 6. № 3. С. 64–67.

7. Gerber P., Zilly B., Teipel U. Feinzerkleinerung von Explosivstoffen // Proc. 29th Int. Annual Conference of ICT. Karlsruhe. 1998. s. 71(1–12).

8. Mikonsaari J., Teipel U. Zerkleinerung Energetischer Materialien in Wasrigen Suspensionen // Proc. 32th Int. Annual Conference of ICT. Karlsruhe. 2001. s. 53(1–12).

9. Патент РФ № 2792356, МПКВ01F 25/72, B01F 23/50, B01F 27/40, B01F 27/80. Роторно-пульсационный аппарат для диспергирования преимущественно в системах «жидкость–твёрдое» // Васишлин М.С., Кухленко А.А., Иванов О.С., Карпов А.Г., Титов С.С. Бюлл. № 9. 2023.

10. Кухленко А.А., Васишлин М.С., Карпов А.Г., Бычин Н.В. Исследование закономерностей эмульгирования в роторно-пульсационном аппарате // Химическая промышленность сегодня. 2008. № 1. С. 36–40.

11. Turner H.E., McCarthy H.E. A Fundamental Analysis of Slurry Grinding // A.I.Ch.E. Journal. 1966. Vol. 12. № 4. p. 784–789.

12. Fanselov S., Emamjomeh S.E., Wirth K.-E., Schmidt J. u.a. Production of spherical wax and polyolefin microparticles by melt emulsification for additive manufacturing // Chemical Engineering Science. 2016. № 141. p. 282–292.

Информация об авторах

М. С. Васишлин – доктор технических

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 1 июня 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 05 марта 2024.

The article was received by the editorial board on 1 June 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 05 Mar 2024.

наук, доцент, главный научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

О. С. Иванов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

А. Г. Карпов – научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

А. А. Антонникова – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

Information about the authors

M.S. Vasilishin - doctor of technical sciences, associate professor, main research scientist of the Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of SB RAS.

O.S. Ivanov - candidate of technical sciences, senior research scientist of the Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of SB RAS.

A.G. Karpov - research scientist of the Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of SB RAS.

A.A. Antonnikova - candidate of physical-mathematical sciences, research scientist of the Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of SB RAS.