

КРИТЕРИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКИХ СРЕД ЛИСТОВОЙ МЕШАЛКОЙ

А.В. Шибашов, А.А. Валамин

Антон Владимирович Шибашов*, Артем Алексеевич Валамин
Ивановский государственный химико-технологический университет,
г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7.
E-mail: shibashovav@gmail.com*, Valamin2003@mail.ru

В статье представлены результаты моделирования процесса перемешивания двух жидких сред при помощи листовой мешалки. Проведено исследование влияния числа оборотов мешалки на энергию потребляемую мешалкой в процессе перемешивания. Оценено влияние вязкости перемешиваемой среды, в качестве модельных жидкостей использована вода и раствор этилового спирта. Получено критериальное уравнение взаимосвязи коэффициента мощности мешалки и режима перемешивания.

Ключевые слова: листовая мешалка, интенсивность перемешивания, критериальное уравнение

CRITERION EQUATION FOR THE PROCESS OF MIXING LIQUID MEDIA WITH A SHEET STIRRER

A.V. Shibashov, A.A. Valamin

Anton Vladimirovich Shibashov*, Artem Alekseevich Valamin
Ivanovo State University of Chemical Technology,
Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7.
E-mail: shibashovav@gmail.com*, Valamin2003@mail.ru

The article presents the results of modeling the process of mixing two liquid media using a sheet stirrer. A study was conducted to determine the effect of stirrer speed on the energy consumed by the stirrer during mixing. The effect of the viscosity of the stirred medium was assessed, using water and an ethyl alcohol solution as model fluids. A criterial equation for the relationship between the mixer power factor and the mixing mode is obtained.

Keywords: sheet stirrer, stirring intensity, criteria equation

Для цитирования:

Шибашов А.В., Валамин А.А. Критериальное уравнение процесса перемешивания жидких сред листовой мешалкой. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение.* 2026. № 2. С. 136-140. DOI: 10.6060/snt.20268602.17

For citation:

Shibashov A.V., Valamin A.A. Criteria equation for the process of mixing liquid media with a sheet mixer. *Modern high technology. Regional application.* 2026. N 2. P. 136-140. DOI: 10.6060/snt.20268602.17

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Перемешивание жидкостей играет ключевую роль в широком спектре промышленных процессов, включая химическое производство, биотехнологии, пищевую промышленность и многие

другие области. Эффективное управление процессом перемешивания позволяет оптимизировать производительность оборудования, снизить энергозатраты и повысить качество конечного продукта. Поэтому моделирование и исследование динамики перемешивания являются важными аспек-

тами научных исследований и инженерных работ [1, 2].

Одним из наиболее распространенных методов является численное моделирование с использованием вычислительной гидродинамики (CFD). Этот метод позволяет анализировать движение жидкости внутри резервуара или реактора, учитывая влияние геометрии емкости, скорости вращения мешалки и вязкости среды. CFD моделируют поток жидкости путем решения уравнений Навье-Стокса, что позволяет предсказывать распределение скоростей, концентраций компонентов и температур в объеме рабочей зоны.

Основные преимущества численного моделирования включают:

- Возможность анализа сложных геометрических форм и условий эксплуатации.
- Экономия ресурсов и времени по сравнению с экспериментальным исследованием.
- Повышение точности проектирования новых установок и оптимизации существующих.

Однако существуют и ограничения:

- Высокая требовательность к мощности компьютеров и квалификации инженеров-аналитиков.
- Необходимость подбора начальных и граничных условий, влияющих на точность результатов.

Для проверки адекватности моделей используются эксперименты. Опытным путем устанавливают взаимосвязь между параметрами, оказывающими влияние на процесс перемешивания. Результаты экспериментальных исследований подвергают обработке математическими методами, и представляют в виде степенных уравнений, связывающих критерии гидродинамического подобия. Полученные данные позволяют подтвердить правильность расчетов и выявить возможные недостатки в построенных моделях [2-5].

Экспериментальное изучение требует значительных затрат времени, однако оно обеспечивает надежные эмпирические данные, необходимые для дальнейшего совершенствования теоретических подходов.

При проектировании установки для перемешивания важно учитывать ряд факторов, оказывающих значительное воздействие на эффективность протекания технологических процессов:

- Геометрия рабочего объема (форма и размеры сосуда).
- Тип и расположение мешалок (количество лопастей, угол наклона, расстояние от дна).
- Физико-химические свойства перемешиваемой среды (вязкость, плотность, поверхностное натяжение).

– Режимы работы аппарата (скорость вращения вала мешалки, давление газа при пневматическом перемешивании, и т.п.).

Каждый фактор оказывает специфическое влияние на формирование турбулентных зон и распределение компонентов перемешиваемой среды по объему. Например, высокая скорость вращения увеличивает интенсивность массообмена, но одновременно повышает энергопотребление и износ механических частей устройства.

Моделируемые процессы широко используются при разработке нового технологического оборудования, подборе оптимального режима эксплуатации действующего на производстве оборудования, проведении предварительных испытаний перед масштабированием пилотных проектов. Они помогают сократить затраты на изготовление прототипов и ускорить внедрение инноваций.

Таким образом, моделирование процесса перемешивания в жидких средах представляет собой важный инструмент повышения эффективности производственных процессов. Современные методы численного анализа и экспериментов обеспечивают возможность детального изучения поведения растворов и суспензий, позволяя создавать высокоэффективные технологические линии и снижать производственные издержки.

Одним из типов мешалок, используемых в промышленных процессах, являются листовые мешалки. Они находят широкое применение в различных областях промышленности благодаря своей эффективности и простоте устройства. В химической промышленности их используют для растворения твердых веществ в жидкости и подготовки растворов различного состава, а так же для эмульгирования и создание однородных смесей для дальнейших технологических операций.

Листовые мешалки предназначены для проведения процесса перемешивания жидких сред с вязкостью до 50 сПз в емкостях малого и среднего объема (от 1 до 50 м³). Листовые мешалки являются разновидностью лопастных мешалок, их отличительной особенностью являются лопасти большой ширины, в которых проделывают отверстия для уменьшения гидравлического сопротивления и создания струй жидкости при вращении мешалки. Образующиеся струи позволяют быстрее растворять твердые вещества, особенно крупнокусковые материалы, поскольку струя за счет удара дробит кусочки твердой фазы на более мелкие частицы, увеличивая тем самым поверхность контакта фаз [6-10].

Несмотря на обширные экспериментальные исследования, связанные с моделированием работы мешалок различной конструкции и размеров, в справочной литературе практически отсутствуют подобные данные для листовых мешалок, наиболее близкие исследования проводились японскими учеными под руководством Нагаты Ионагимото для лопастных мешалок с различной шириной лопасти [2].

Отсутствие справочных данных на стадии проектировании перемешивающего агрегата вынуждает закладывать в его конструкцию электродвигатель с номинальной мощностью, превышающей необходимую в несколько десятков раз, для избегания аварийных ситуаций. Большие энергозатраты являются существенным ограничением при выборе листовой мешалки в качестве перемешивающего устройства, поэтому актуальной задачей является установление взаимосвязи между коэффициентом мощности и режимом перемешивания для листовых мешалок.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис.1.

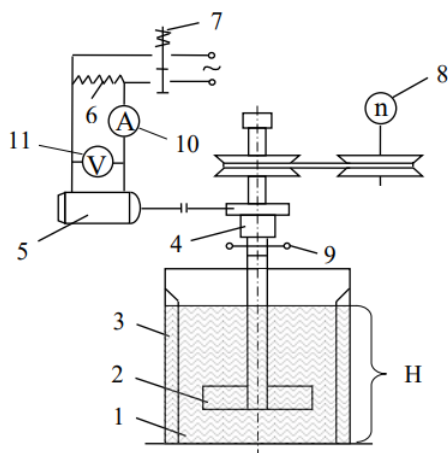


Рис. 1 Схема экспериментальной установки: 1 – бак для жидкости; 2 – мешалка; 3 – перегородка; 4 – червячный редуктор; 5 – двигатель; 6 – автотрансформатор; 7 – пускатель; 8 – тахометр; 9 – винт; 10 – амперметр; 11 – вольтметр.

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup: 1 – liquid tank; 2 – stirrer; 3 – partition; 4 – worm gear; 5 – motor; 6 – auto-transformer; 7 – starter; 8 – tachometer; 9 – screw; 10 – ammeter; 11 – voltmeter.

В бак для перемешиваемой жидкости (1), оборудованный вертикальными перегородками (3) для предотвращения образования воронки, помещается сменная мешалка (2), которая приводится во вращение от электродвигателя (5). Частота вращения двигателя регулируется при помощи

автотрансформатора (6). В работу двигатель включается пускателем (7). Частота вращения вала мешалки измеряется тахометром (8), соединенным с валом электродвигателя. К валу установки с помощью винта (9) крепится мешалка. Увеличением напряжения на электродвигателе при помощи автотрансформатора устанавливается частота вращения мешалки. Сила тока и напряжение измеряются по электроприборам (10) и (11) соответственно.

Ход эксперимента:

1. Бак заполняется жидкостью до контрольной отметки (Н).
2. При включенном пускателе устанавливается мешалка и закрепляется на валу двигателя винтом.
3. Включается пускатель и поворотом ручки автотрансформатора устанавливается значение мощности (U) в диапазоне 20 – 100 В.
4. При заданном напряжении фиксируются показания амперметра (A) и тахометра (n).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения исследований была использована листовая мешалка со следующими геометрическими размерами: высота лопасти (h) = 22,7 см; ширина лопасти (b) = 16,5 см; диаметр отверстий (d_0) = 2 см; расстояние между центрами 2-х смежных отверстий (x) = 5,7 см; расстояние между центрами 2-х параллельных отверстий (a) = 10,4 см.

В качестве модельных жидкостей использовали дистиллированную воду и 10% раствор этилового спирта.

Схема мешалки представлена на рис.2.

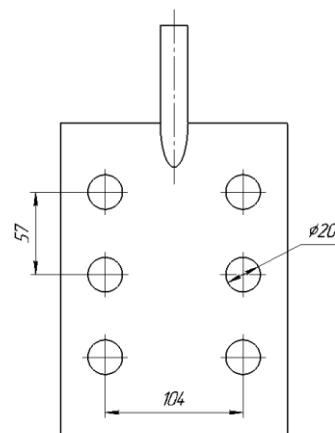


Рис. 2 Схема листовой мешалки
Fig. 2. Schematic diagram of a sheet stirrer

В ходе экспериментов исследовалось влияние следующих параметров на мощность потребляемую мешалкой: частота вращения мешалки (n); высота заполнения бака жидкостью (Н); вязкость и плотность перемешиваемой среды.

Экспериментальные исследования с использованием воды в качестве модельной жидкости проводились при различном соотношении H/d , при этом оценивалась мощность холостого хода мешалки и полезная мощность, затрачиваемая на перемешивание. Температура воды составляла 19 °С, вязкость

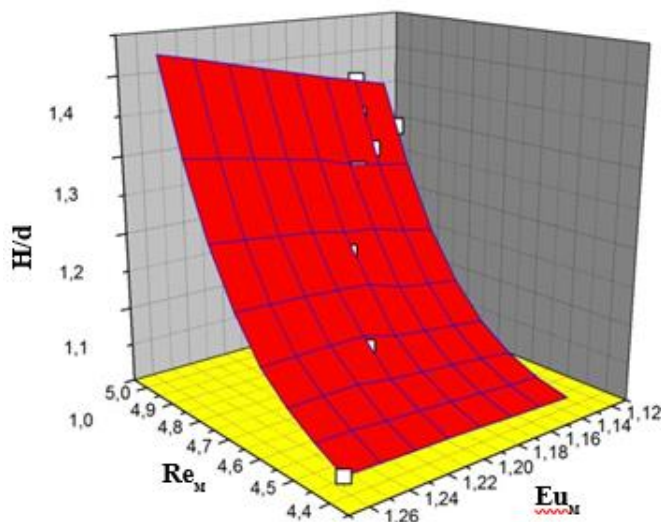


Рис. 3. Зависимость критерия мощности мешалки от режима перемешивания и геометрического симплекса H/d при использовании воды в качестве перемешиваемой среды.
Fig. 3. Dependence of the stirrer power criterion on the mixing mode and the geometric simplex H/d when using water as the stirred medium.

Результатом исследований является степенное уравнение, которое выражает взаимосвязь между полезной мощностью и режимом перемешивания с учетом влияния высоты заполнения резервуара перемешиваемой средой.

Обработку экспериментальных данных можно проводить графически или аналитически. Графический метод применим только в тех случаях, когда взаимосвязь устанавливается между двумя параметрами. Поскольку итоговое критериальное уравнение представляется в виде степенной зависимости между тремя параметрами, то необходимо использовать аналитический метод, который заключается в решении системы уравнений, составленных из критериев гидромеханического подобия. В частности определяемым критерием является критерий мощности, в который входит искомая полезная мощность, а определяющими критериями являются критерий Рейнольдса и геометрический симплекс H/d [11-15].

Программный пакет Mathcad позволяет быстро и наиболее точно установить вид степенной функции. Для этого необходимо составить систему линейных уравнений. Линеризация степенной зависимости производится путем логарифмирования и приводится к виду:

при данной температуре 1,019 мПа·с, плотность 998,43 кг/м³. Используя экспериментальные данные вычислили модифицированный критерий Рейнольдса (Re_M) и критерий мощности ($K_N = Eu_M$), по которым была построена поверхность представленная на рис. 3.

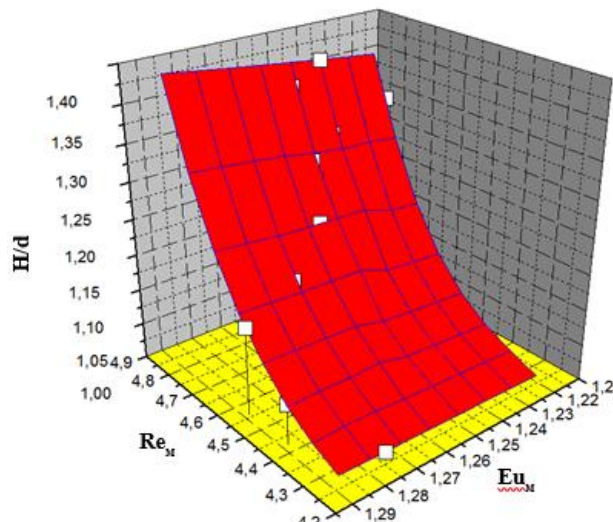


Рис. 4. Зависимость критерия мощности мешалки от режима перемешивания и геометрического симплекса H/d при использовании раствора этанола в качестве перемешиваемой среды.
Fig. 4. Dependence of the stirrer power criterion on the mixing mode and the geometric simplex H/d when using ethanol solution as the stirred medium

$$\lg(K_N) = \lg(A) + n \cdot \lg(Re_M) + m \cdot \lg(H/d).$$

Коэффициенты связи A , n и m определяются путем подбора в среде MathCad с использованием функции «ISolve». Для случая с использованием воды в качестве модельной жидкости было получено критериальное уравнение следующего вида:

$$Eu_M = 4,73 \cdot Re_M^{-0,211} \cdot \left(\frac{H}{d}\right)^{0,61}.$$

Аналогичные исследования были проведены и для процесса перемешивания раствора этанола, который характеризуется большей вязкостью и меньшей плотностью по сравнению с водой. При температуре 21 °С, вязкость этанола 1,19 мПа·с, плотность 789 кг/м³.

Результаты обработки экспериментальных данных представлены на рис. 4.

Уравнение выражающее зависимость критерия мощности от критерия Рейнольдса и геометрического симплекса H/d для процесса перемешивания раствора этанола в этом случае имеет вид:

$$Eu_M = 4,74 \cdot Re_M^{-0,206} \cdot \left(\frac{H}{d}\right)^{0,54}.$$

Критериальные уравнения, полученные для двух модельных жидкостей, имеют незначительные различия.

тельное расхождение в коэффициентах связи, это может быть обусловлено влиянием воронки, возникающей в процессе перемешивания. Воронка не достигает глубины, при которой бы лопасти мешалки оголялись, в небольшой степени снижает эффективный перемешиваемый объем жидкости.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

REFERENECES

1. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барбаш В.М. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. Л: Химия, 1984. 336 с.
2. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. Перевод с польск. под ред. И.А. Шупляка Л: Химия, 1975. 384 с.
3. Оттино Д.М. Перемешивание жидкостей. *В мире науки*. № 3. 1989. С. 34 – 45.
4. Климов Д.М., Петров А.Г., Георгиевский Д.В. Вязкопластические течения. Динамический хаос, устойчивость, перемешивание. М.: Наука, 2005. 394 с.
5. Андерсен Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М.: МИР, 1990. 385 с.
6. ГОСТ 20680-2002. Аппараты с механическими перемешивающими устройствами. Общие технические условия.
7. АТК 24.201.17-90. Мешалки. Типы, параметры, конструкция, основные размеры и технические требования.
8. Диссольтеры / Текст : электронный // НПО АГРОМАШ. – URL: <https://www.agromash.ru/AGROMASH/PISHEVOE/Dissolver.html?ysclid=m3gwbtflov310556626>
9. Рыбин Н.В. Подбор диспергирующего оборудования для производства пигментированных лакокрасочных материалов / Н. В. Рыбин. Текст: электронный // Технология производства ЛКМ. 2022. URL: https://www.himtek-yar.ru/useful/lkm_technology/1669/
10. Ермаков М.К., Никитин С.А., Полежаев В.И. Система и компьютерная лаборатория для моделирования конвективного тепло- и массообмена. *Изв. РАН, сер. Механика жидкости и газа*. № 3, 1997. С. 22–38.
11. Бобков С.П., Астраханцева И.А. Использование вероятностных клеточных автоматов для моделирования течения жидкости. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2022. № 2(70). С. 47-54. DOI:10.6060/snt.20227002.0006
12. Кроули У. FLAG – свободно-лагранжев метод для численного моделирования гидродинамических течений в двух измерениях. *Численные методы в механике жидкостей*. М.: МИР, 1973. С. 133–145.
13. Бобков С.П., Астраханцев Р.Г., Павлова Е.А. Исследование структуры потоков в технологических аппаратах с использованием дискретных динамических моделей. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. № 1(77). С. 95-101. DOI: 10.6060/snt.20247701.00013
14. Франк А.М. Дискретные модели несжимаемой жидкости. М.: Физматлит, 2001. 208 с.
15. Андронов П.Р., Гувернюк С.В., Дынникова Г.Я. Лагранжев численный метод решения двумерных задач свободной конвекции. Труды 4-й Росс. нац. конф. по теплообмену. Т. 3. М.: Изд. Дом МЭИ, 2006. С. 38–41.
1. Braginsky L.N., Begachev V.I., Barbash V.M. Mixing in liquid media: Physical foundations and engineering methods of calculation. L: Chemistry, 1984. 336 p.
2. Strenk F. Mixing and apparatus with stirrers. Translated from Polish. ed. I.A. Schuplyak L: Chemistry, 1975. 384 p.
3. Ottino D.M. Mixing liquids. *In the world of science*. № 3. 1989. P. 34-45.
4. Klimov D.M., Petrov A.G., Georgievsky D.V. Viscoplastic currents. Dynamic chaos, stability, mixing. M.: Nauka, 2005. 394 p.
5. Andersen D., Tannehill J., Pletcher R. Computational Hydromechanics and Heat Exchange. M.: MIR, 1990. 385 p.
6. GOST 20680-2002. Devices with mechanical mixing devices. General specifications.
7. ATK 24.201.17-90. Stirrers. Types, parameters, design, main dimensions and technical requirements.
8. Dissolvers / Text: electronic // NPO AGROMASH. – URL: <https://www.agromash.ru/AGROMASH/PISHE-VOE/Dissolver.html?ysclid=m3gwbtflov310556626>
9. Rybin N.V. Selection of dispersing equipment for the production of pigmented paints and varnishes. Text: electronic // PM production technology. 2022. URL: https://www.himtek-yar.ru/useful/lkm_technology/1669/
10. Ermakov M.K. System and computer laboratory for modeling convective heat and mass transfer/M.K. Ermakov, S.A. Nikitin, V.I. Polezhaev//Izv. RAS, ser. Fluid and gas mechanics. – №3, 1997. - P. 22-38.
11. Bobkov S.P., Astrakhantseva I.A. Using probabilistic cellular automata for fluid flow modeling. *Modern high technologies. Regional application*. 2022. N 2(70). P. 47-54. DOI:10.6060/snt.20227002.0006
12. Crowley U. FLAG - free-Lagrangian method for numerical modeling of hydrodynamic currents in two dimensions. *Numerical methods in fluid mechanics*. M.: MIR, 1973. P. 133-145.
13. Bobkov S.P., Astrakhancev R.G., Pavlova E.A. Study of the structure of flows in technological devices using discrete dynamic models. *Modern high technologies. Regional application*. N 1(77). P. 95-101. DOI: 10.6060/snt.20247701.00013
14. Frank A.M. Discrete incompressible fluid models. M.: Fizmatlit, 2001. 208 p.
15. Andronov P.R., Guvernyuk S.V., Dynnikova G.Ya. Lagrangev numerical method for solving two-dimensional problems of free convection. Proceedings of the 4th Ross. nat. conf. by heat exchange. Vol. 3. M.: Ed. MPEI House, 2006. P. 38-41.

Поступила в редакцию (Received) 24.03.2026

Принята к опубликованию (Accepted) 18.05.2026