

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ МЕШАЛОК ДЛЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЕМКОСТНЫХ АППАРАТАХ

Е. И. Мартьянов, С. В. Карпушкин

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,
karp@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: затраты мощности на перемешивание; интенсивность перемешивания; механические перемешивающие устройства; параметры конструкций.

Аннотация: Представлены результаты оценки влияния конструкционных параметров наиболее распространенных механических мешалок на интенсивность перемешивания и затраты мощности. Расчеты проведены по математической модели процесса механического перемешивания с применением осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, замкнутых уравнениями турбулентности, и программы, разработанной на основе системы конечно-элементного анализа Open FOAM.

Введение

В работе [1] предложены:

- постановка задачи оптимизации параметров конструкции и режима функционирования механических перемешивающих устройств (МПУ) вертикальных емкостных аппаратов, критерием оптимальности решения которой является суммарная длина вектора скорости перемешиваемой среды;
- математическая модель процесса механического перемешивания (ПМП) с применением осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, замкнутых уравнениями турбулентности, адекватность которой подтверждена результатами натуральных экспериментов;
- методика оптимизации параметров конструкции и режима функционирования МПУ, предусматривающая обоснование выбора перебираемых значений параметров их конструкции и режима функционирования.

В работе рассматриваются вопросы оптимизации параметров конструкций наиболее распространенных механических мешалок (двухлопастной, турбинной открытой, трехлопастной с наклонными лопастями) с точки зрения значений суммарной длины вектора скорости перемешиваемой среды K_{SVS} и затрат мощности на перемешивание $P_{дв}$. Расчеты проведены с применением математической модели, предложенной в [1], для решения которой использована программа, разработанная на основе системы конечно-элементного анализа Open FOAM [2]. В расчетах использованы уточненные аналитические зависимости коэффициентов мощности перемешивания (см. соотношение (6) в [1]).

Для двухлопастной мешалки

$$K_{NA} = \frac{1}{\text{Re}_{\text{ц}}^2} \left(762,3 + \frac{847h_m}{D_m} \right),$$

где h_m – высота расположения мешалки над дном аппарата, м; D_m – диаметр мешалки, м; $\text{Re}_{\text{ц}} = nD_m^2/\nu$ – циркуляционный критерий Рейнольдса; n – частота вращения мешалки, 1/с; ν – кинематическая вязкость перемешиваемой среды, м²/с.

Для турбинной открытой мешалки

$$K_{NA} = \frac{N}{\text{Re}_{\text{ц}}^{0,43}} \left(0,000044 + \frac{0,00038h_m}{6D_m} \right),$$

где N – число лопастей мешалки.

Для трехлопастной мешалки с наклонными лопастями

$$K_{NA} = \frac{3}{\text{Re}_{\text{ц}}^{0,57}} \left(0,000144 + \frac{0,00048h_m}{3D_m} \right).$$

Напомним, что основным параметром режима реализации ПМП является частота вращения вала мешалки n , оказывающая непосредственное влияние на интенсивность перемешивания, причем для каждого типа мешалки существуют интервалы значений n , в которых они работают наиболее эффективно. На основе источников [3, 4] и проведенных исследований [5] определены интервалы эффективной работы наиболее распространенных конструкций механических мешалок:

- для двухлопастной мешалки $n \in [10, 100]$ об/мин;
- для открытой турбинной мешалки: $n \in [150, 350]$ об/мин;
- для трехлопастной мешалки с наклонными лопастями $n \in [350, 750]$ об/мин.

Расчеты по определению оптимальных значений параметров конструкций перечисленных типов мешалок проведены для вертикального емкостного аппарата с эллиптическим дном объемом 50 л, в котором перемешивается вода при температуре $t = 20$ °С и давлении $P = 1,013$ КПа (плотность $\rho = 998$ кг/м³, динамическая вязкость $\mu = 0,001$ Па·с), при средних значениях n из рекомендуемых интервалов. Внутренний диаметр корпуса аппарата $D_r = 0,4$ м, его высота $H_r = 0,45$ м, объем перемешиваемой жидкости 35 л.

Двухлопастная мешалка

Конструктивные параметры двухлопастной мешалки (рис. 1): диаметр D_m , высота H_m и толщина S_1 лопасти, высота ее установки над дном аппарата h_{hm} .

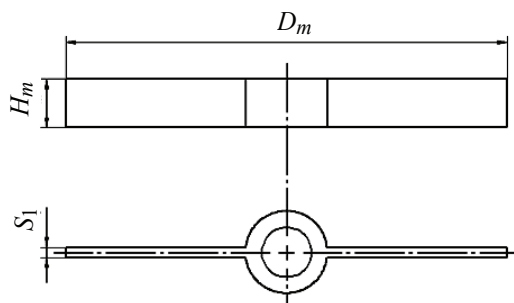


Рис. 1. Двухлопастная мешалка

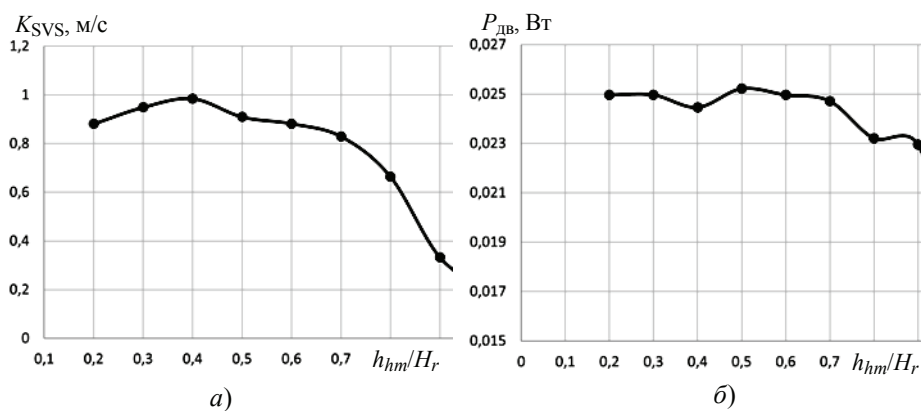


Рис. 2. Влияние значения h_{hm}/H_r на суммарный вектор скорости (а) и затраты мощности на перемешивание (б) для двухлопастной мешалки

В монографии [3] и нормативном документе [6] даны следующие рекомендации по выбору параметров конструкции такой мешалки:

- диаметр мешалки $D_m \in [0,4D_r, 0,667D_r]$;
- отношение высоты лопасти к диаметру мешалки $H_m/D_m = 0,1$;
- отношение толщины лопасти мешалки к ее высоте $S_1/H_m = 0,1$.

Очевидно, что при увеличении значений D_m/D_r и H_m/D_m интенсивность перемешивания будет расти, но соответственно увеличатся и затраты мощности на перемешивание. Оптимальными будут значения, обеспечивающие выполнение ограничения на максимально допустимую мощность привода аппарата. Увеличение значения S_1/H_m не окажет влияния на интенсивность перемешивания, но соответствующее увеличение массы мешалки увеличит затраты мощности.

Влияние изменения значения отношения высоты расположения мешалки над днищем аппарата к высоте корпуса аппарата h_{hm}/H_r на значение суммарной длины вектора скорости перемешиваемой среды и затраты мощности на перемешивание установлено в результате расчетов, результаты которых иллюстрирует рис. 2.

Как видно, наибольшая интенсивность перемешивания и минимальные затраты мощности соответствует значению $h_{hm}/H_r = 0,4$.

Открытая турбинная мешалка

Конструктивные параметры открытой турбинной мешалки (рис. 3): диаметр мешалки D_m ; высота H_m , ширина L_m и толщина S_1 лопасти мешалки, а также их число N ; диаметр диска D_d и его толщина S_2 ; высота установки мешалки над днищем аппарата h_{hm} .

Учитывая сложность конструкции мешалки, проведены исследования влияния на значение суммарной длины вектора скорости перемешиваемой среды числа лопастей N , отношений D_m/D_r , D_d/D_m , и h_{hm}/H_r . Результаты расчетов суммарной длины вектора скорости перемешиваемой среды и затрат мощности на перемешивание в зависимости от числа лопастей мешалки приведены на рис. 4.

Как видно, при $N > 6$ интенсивность перемешивания практически не увеличивается, однако затраты мощности растут за счет увеличения массы мешалки и ее гидросопротивления. Следовательно, мешалка с шестью лопастями является наиболее эффективной.

Значение отношения высоты лопасти к диаметру мешалки H_m/D_m обычно принимают равным 0,3, так как дальнейшее увеличение значения H_m потребует дополнительного усиления лопастей, которое приведет к увеличению массы мешалки и снижению интенсивности перемешивания по причине ухудшения огибания профиля лопасти и появления застойных зон вблизи ее поверхности, а также может привести к нарушению условий виброустойчивости, жесткости и прочности вала привода [7].

Помимо этого, при перемешивании образуется воронка, и чем интенсивнее перемешивание, тем больше глубина воронки. Если воронка опустится до ступицы мешалки, то большая часть перемешиваемой среды переместится к стенкам корпуса аппарата и интенсивность перемешивания снизится. Рисунок 5 иллюстрирует резкое снижение интенсивности перемешивания и ускоренный рост затрат мощности на перемешивание при

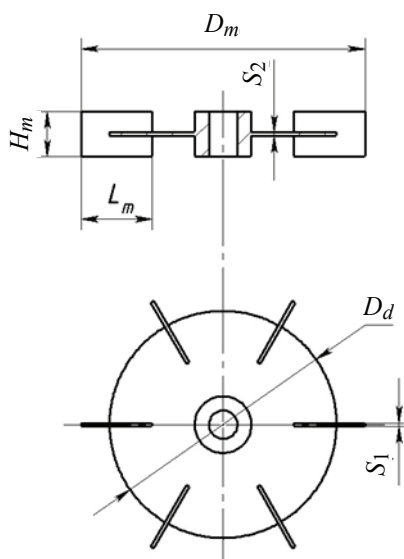


Рис. 3. Открытая турбинная мешалка

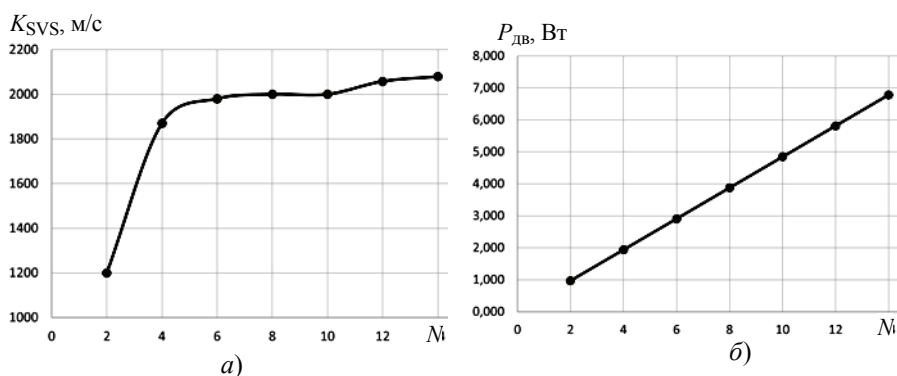


Рис. 4. Влияние числа лопастей турбинной открытой мешалки на суммарный вектор скорости (а) и затраты мощности на перемешивание (б)

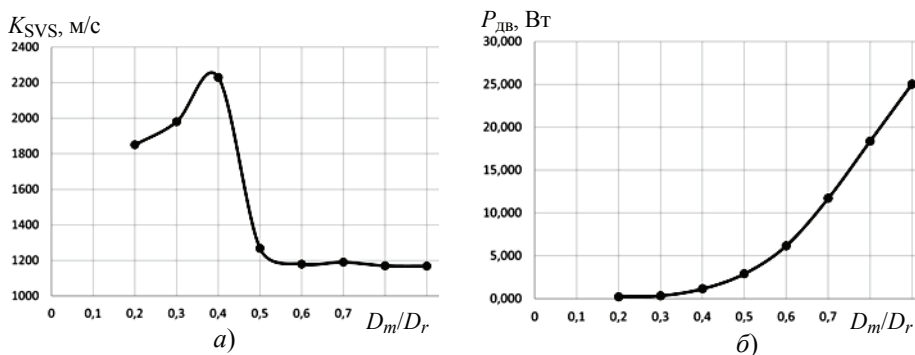


Рис. 5. Влияние отношения диаметров турбинной открытой мешалки и аппарата на суммарный вектор скорости (а) и затраты мощности на перемешивание (б)

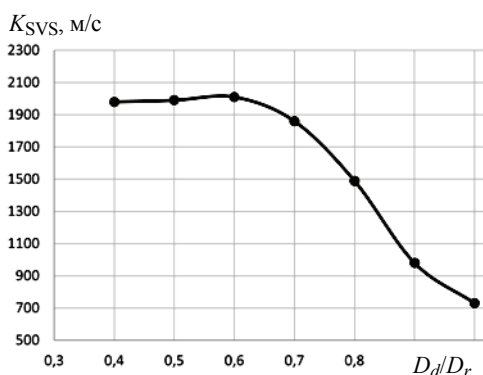


Рис. 6. Влияние отношения диаметров диска и мешалки на суммарный вектор скорости

жению интенсивности перемешивания (рис. 6). При значениях D_d , близких к D_m , диск разрезает лопасти на две половины и превращает турбинную мешалку в подобие дисковой. Таким образом, оптимальным является значение отношения $D_d/D_m = 0,6$.

Ширина лопасти мешалки L_m не может быть меньше половины разности диаметров мешалки и диска (условие крепления к диску) и больше половины разности диаметров мешалки и ступицы, то есть $0,2D_m < L_m < 0,3D_m$. Принято $L_m/D_m = 0,25$.

В ходе определения оптимальной высоты расположения мешалки над днищем аппарата h_{hm} выявлена следующая закономерность: чем ниже устанавливается мешалка, тем выше эффективность перемешивания за счет усиления циркуляционных потоков в ограниченном пространстве (появляются дополнительные завихрения) (рис. 7). Для соблюдения норм безопасности проектирования оборудования [8], начальным выбрано значение $h_{hm}/H_r = 0,2$, а в качестве оптимального выбрано минимальное безопасное значение h_{hm} , при котором $h_{hm}/H_r = 0,3$.

Графики зависимостей затрат мощности на перемешивание от изменений отношения D_d/D_m и отношения h_{hm}/H_r не приводятся, так как изменения мощности не превышают 5 %.

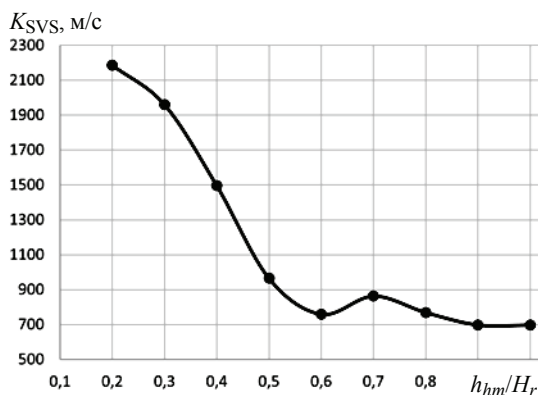


Рис. 7. Влияние отношения высоты расположения турбинной открытой мешалки к высоте корпуса аппарата на суммарный вектор скорости

значении отношения диаметра мешалки к диаметру аппарата D_m/D_r , превышающем 0,4, по причине чрезмерного увеличения глубины воронки. Следовательно, значение $D_m/D_r = 0,4$ является оптимальным для данного типа мешалки.

При исследовании влияния диаметра диска на интенсивность перемешивания точкой отсчета выбрано значение $D_d/D_m = 0,4$ (из-за наличия ступицы, предназначенной для крепления мешалки к валу привода).

Расчеты показали, что увеличение значения D_d/D_m приводит к сни-

Трехлопастная мешалка

Согласно [2, 6], рекомендованы следующие значения параметров конструкции мешалки (рис. 8): диаметр $D_m \in [0,1D_r, 0,4D_r]$; отношение высоты лопасти к диаметру мешалки $H_m/D_m = 0,1$; отношение толщины лопасти мешалки к ее высоте $S_1/H_m = 0,1$.

На рисунке 9 представлены результаты расчета суммарного вектора скорости перемешиваемой среды при изменении значения отношения h_{hm}/H_r в интервале $[0, 1]$, на рис. 10, 11 – зависимости суммарного вектора скорости и затрат мощности на перемешивание от значения отношения диаметров мешалки и аппарата D_m/D_r и угла наклона лопастей мешалки.

Поскольку рекомендуемая высота расположения мешалки над днищем аппарата $h_{hm} \leq 0,5H_r$ [3, 6], а значение K_{SVS} при $h_{hm}/H_r = 0,7$ превосходит его значение при $h_{hm}/H_r = 0,5$ менее чем на 2 %, в качестве оптимального принято значение $h_{hm}/H_r = 0,5$.

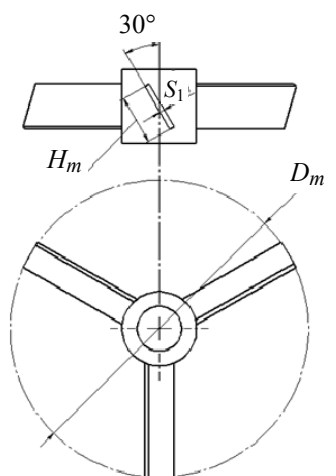


Рис. 8. Трехлопастная мешалка с лопастями, наклоненными под углом 30°

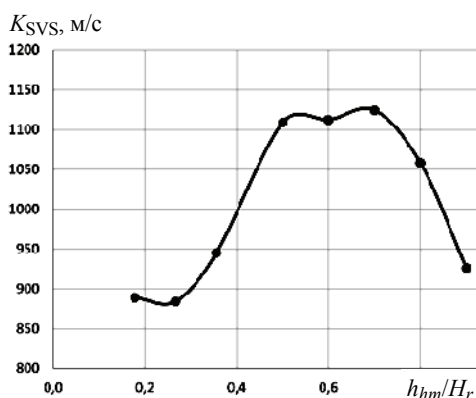


Рис. 9. Влияние изменения отношения высоты расположения трехлопастной мешалки к высоте корпуса аппарата на суммарный вектор скорости

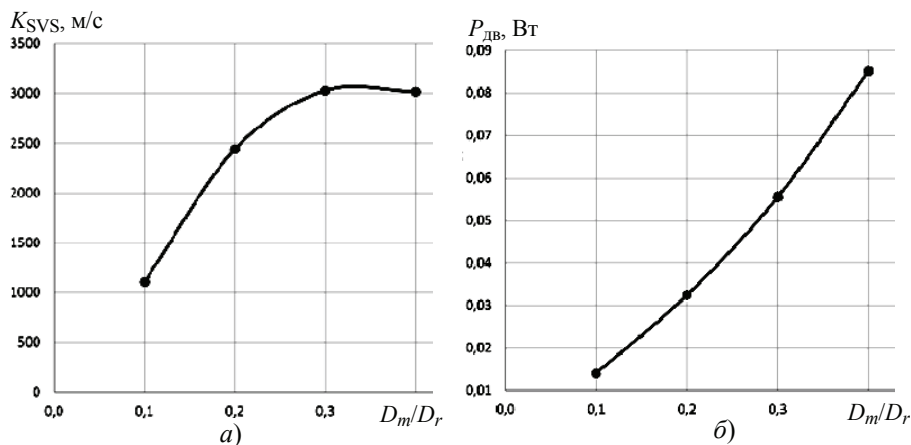


Рис. 10. Влияние отношения диаметров трехлопастной мешалки и аппарата на суммарный вектор скорости (а) и затраты мощности (б)

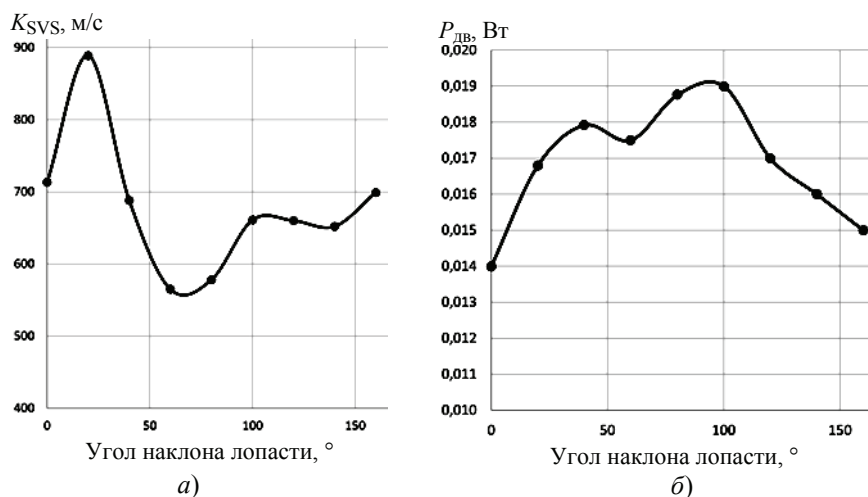


Рис. 11. Влияние угла наклона лопастей трехлопастной мешалки на суммарный вектор скорости (а) и затраты мощности (б)

График изменения мощности, затрачиваемой на перемешивание, при изменении высоты установки мешалки над уровнем дна не приводится, так как значение мощности изменяется в пределах 3 %. В качестве оптимального выбрано значение $D_m/D_r = 0,33$, соответствующее максимальной интенсивности перемешивания и верхней границе интервала значений этого отношения, рекомендуемых в [3, 6]. Как видно, максимальной интенсивности перемешивания соответствует угол наклона лопастей 20° , то есть результаты расчетов не соответствуют рекомендациям [3, 6] – 30° , причем разница соответствующих значений K_{SVS} превышает 10 %.

Заключение

Таким образом, по результатам расчетов можно рекомендовать следующие значения параметров конструкции наиболее распространенных механических мешалок. Наибольшая интенсивность перемешивания двухлопастной мешалкой и минимальные затраты мощности соответствуют высоте ее расположения над днищем аппарата $h_{hm} = 0,4H_r$.

Значения конструктивных параметров открытой турбинной мешалки, обеспечивающие максимум интенсивности перемешивания:

- число лопастей мешалки $N = 6$;
- отношение диаметра диска к диаметру мешалки $D_d/D_m = 0,6$;
- отношение ширины лопасти к диаметру мешалки $L_m/D_m = 0,25$;
- отношение высоты расположения мешалки над днищем аппарата к высоте корпуса аппарата $h_{hm}/H_r = 0,3$;
- отношение высоты лопасти к диаметру мешалки $H_m/D_m = 0,3$;
- отношение диаметра мешалки к диаметру аппарата $D_m/D_r = 0,4$;
- толщины лопасти мешалки и диска $S_1 = S_2 = 0,1H_m$.

Оптимальные значения конструктивных параметров мешалки с наклонными лопастями:

- отношение высоты расположения мешалки к уровню жидкости в аппарате $h_{hm}/H_r = 0,5$;
- отношение диаметров мешалки и аппарата $D_m/D_r = 0,33$;
- угол наклона лопастей мешалки 20° .

Список литературы

1. Мартьянов, Е. И. Оптимизация процесса перемешивания жидкости в вертикальных емкостных аппаратах с механическими перемешивающими устройствами / Е. И. Мартьянов, С. В. Карпушкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 280 – 293. doi: 10.17277/vestnik.2023.02.pp.280-293
2. OpenFOAM – открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред – Текст : электронный. URL : <http://fsweb.info/caesad/openfoam.html> (дата обращения : 10.06.2023).
3. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах. Физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш – Л. : Химия, 1984. – 336 с.
4. Paul, E. L. Handbook of Industrial Mixing. Science and Practice / E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, S. M. Kresta. – Hoboken, NJ. 2003. – 1377 p.
5. Мартьянов, Е. И. Исследование влияния конструкции мешалки на интенсивность перемешивания / Е. И. Мартьянов, Е. Н. Малыгин // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во Тамб. ГТУ, 2020. – С. 143 – 148.
6. Руководящий нормативный документ РД 26-01-90-85. Механические перемешивающие устройства, метод расчета. – Введ. 01.01.1986. – Л. : РТП ЛенНИИхиммаша, 1985. – 257 с.
7. Руководящий технический материал РД РТМ 26-01-72-82. Валы вертикальных аппаратов с перемешивающими устройствами, методы расчета. – Введ. 01.07.1983. – Л. : РТП ЛенНИИхиммаша, 1982. – 140 с.
8. Лацинский, А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры : справочник / А. А. Лацинский, А. Р. Толчинский. – М. : Альянс, 2011. – 752 с.

Optimization of Design Parameters of Mechanical Stirrers for Liquid Mixing in Vertical Pressure Vessels

E. I. Martyanov, S. V. Karpushkin

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering,
karp@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: power consumption for mixing; mixing intensity; mechanical mixing devices; design parameters.

Abstract: The results of assessing the influence of the design parameters of the most common mechanical mixers on the intensity of mixing and power consumption are presented. Calculations were carried out using a mathematical model of the mechanical mixing process using Reynolds-averaged Navier–Stokes equations closed by turbulence equations, and a program developed on the basis of the Open FOAM finite element analysis system.

References

1. Mart'yanov Ye.I., Karpushkin S.V. [Optimization of the process of mixing liquid in vertical containers with mechanical mixing devices], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 2, pp. 280-293. doi: 10.17277/vestnik.2023.02.pp.280-293 (In Russ., abstract in Eng.)

2. OpenFOAM - an open integrated platform for numerical modeling of problems in continuum mechanics. available at: <http://fsweb.info/caecad/openfoam.html> (accessed 10 June 2023).

3. Braginskiy L.N., Begachev V.I., Barabash V.M. *Peremeshivaniye v zhidkikh sredakh. Fizicheskiye osnovy i inzhenernyye metody rascheta* [Mixing in liquid media. Physical Basics and engineering methods of calculation], Leningrad: Khimiya, 1984, 336 p. (In Russ.)

4. Paul E.L., Atiemo-Obeng V.A., Kresta S.M. Handbook of Industrial Mixing. Science and Practice, Hoboken, NJ. 2003, 1377 p.

5. Mart'yanov Ye.I., Malygin Ye.N. [Study of the influence of the mixer design on the intensity of mixing], *Virtual'noye modelirovaniye, prototipirovaniye i promyshlennyy dizayn: materialy VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Virtual modeling, prototyping and industrial design: materials of the VI International. scientific-practical conf], Tambov: Izdatel'stvo Tambjvskogo GTU, 2020, pp. 143-148. (In Russ., abstract in Eng.)

6. RD 26-01-90-85. *Mekhanicheskiye peremeshivayushchiye ustroystva, metod rascheta* [Mechanical mixing devices, calculation method], Leningrad: RTP LenNIIkhimmasha, 1985, 257 p. (In Russ.)

7. RD RTM 26-01-72-82. *Valy vertikal'nykh apparatov s peremeshivayushchimi ustroystvami, metody rascheta* [Shafts of vertical apparatuses with mixing devices, calculation methods], Leningrad: RTP LenNIIkhimmasha, 1982, 140 p. (In Russ.)

8. Lashchinskiy A.A., Tolchinskiy A.R. *Osnovy konstruirovaniya i rascheta khimicheskoy apparatury: spravochnik* [Fundamentals of design and calculation of chemical equipment: reference book], Moscow: Al'yans, 2011, 752 p. (In Russ.)

Optimierung der Konstruktionsparameter von mechanischen Rührwerken zum Mischen von Flüssigkeiten in vertikalen kapazitiven Behältern

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse der Bewertung des Einflusses der Konstruktionsparameter der gebräuchlichsten mechanischen Rührwerke auf die Mischintensität und den Stromverbrauch vorgestellt. Die Berechnungen sind unter Verwendung des mathematischen Modells des mechanischen Rührprozesses mit Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen, die durch Turbulenzgleichungen geschlossen werden, und eines auf der Grundlage des Finite-Elemente-Analysesystems Open FOAM entwickelten Programms durchgeführt.

Optimisation des paramètres de conception des agitateurs mécaniques pour le mélange de liquide dans les appareils capacitifs verticaux

Résumé: Sont présentés les résultats de l'évaluation de l'impact des paramètres de conception des agitateurs mécaniques les plus courants sur l'intensité du mélange et les coûts de puissance. Sont effectués les calculs à partir d'un modèle mathématique du processus d'agitation mécanique utilisant les équations de Navier-Stokes moyennée par Reynolds, fermées par des équations de turbulence ainsi que les programmes élaborés à la base du système d'analyse par éléments finis Open FOAM.

Авторы: *Мартьянов Евгений Игоревич* – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Карпушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.