

DOI 10.23859/1994-0637-2017-6-81-4
УДК 542.63:621.929

© Кожевников С.О., Блинов О.В., Ершов С.В., Кузнецов В.Б., 2017

Кожевников Сергей Олегович

Кандидат технических наук, доцент,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
E-mail: kojevnikov_so@mail.ru

Kozhevnikov Sergey Olegovich

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
E-mail: kojevnikov_so@mail.ru

Блинов Олег Владимирович

Кандидат технических наук, доцент,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
E-mail: Oleg_blinov@ro.ru

Blinov Oleg Vladimirovich

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
E-mail: Oleg_blinov@ro.ru

Ершов Сергей Владимирович

Кандидат технических наук, доцент,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
E-mail: Oleg_blinov@ro.ru

Ershov Sergey Vladimirovich

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
E-mail: Oleg_blinov@ro.ru

Кузнецов Виктор Борисович

Доктор технических наук, профессор,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
E-mail: kuznetsovtex@gmail.com

Kuznetsov Viktor Borisovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
E-mail: kuznetsovtex@gmail.com

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ
ОКРУЖНОЙ СКОРОСТИ
ЖИДКОСТИ В АППАРАТЕ
С МЕШАЛКОЙ**

**SIMULATION MODEL OF THE
PROFILE OF THE
CIRCUMFERENTIAL
SPEED OF LIQUID IN THE
APPARATUS WITH STIRRER**

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования профиля окружной скорости в аппарате, оснащённом вращающейся мешалкой без внутренних устройств. Для исследуемого процесса выполнен расчет профиля скорости потока жидкости в аппарате с вращающейся мешалкой с учетом коэффициента удаленности от рабочего органа.

Abstract. The article presents the results of simulation modelling of the profile of the circumferential speed in the device equipped with a rotating stirrer without internal devices. For that purpose the calculation of the velocity profile of fluid flow in the apparatus with a rotating stirrer is provided.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, вращающаяся мешалка, окружная скорость

Keywords: computer simulation, rotating the agitator, peripheral speed

Введение

Перемешивание широко применяется во многих отраслях промышленности. Наиболее широко используются вращающиеся мешалки, имеющие простую конструкцию. Создание принципиально новых перемешивающих устройств приводит к необходимости совершенствования теории движения жидкой среды в подобных аппаратах.

Собственные исследования [3] показали, что для снижения энергоемкости процесса перемешивания можно использовать аппарат, оснащенный рабочим органом, состоящим из ротора с трубками переменного сечения. При прохождении жидкости через трубки переменного сечения, которые в свою очередь совершают вращательное движение, скорость среды на выходе многократно возрастает. Моделирование процесса движения жидкой среды позволит определить распределение скоростей движения жидкости в аппарате и представляет особый интерес.

Основная часть

Перемешивающие устройства находят широкое применение во многих отраслях промышленности при проведении различных технологических процессов [3]. Важной задачей в теории перемешивания является распределение скорости в объеме аппарата. Применяемые при решении задач перемешивания методы расчета связаны с гидродинамическими параметрами потока жидкости. Получаемые числовые значения составляющих поля скоростей потока жидкости применяются для расчета таких важных характеристик, как мощность, затрачиваемая на перемешивание, время перемешивания и коэффициенты теплопередачи [3], [5].

Особый интерес представляет исследование распределения поля скоростей для аппаратов, оснащенных новыми перемешивающими устройствами. В таких устройствах жидкая среда проходит через трубки переменного сечения, вращающихся вокруг центральной оси (рис. 1) [3].

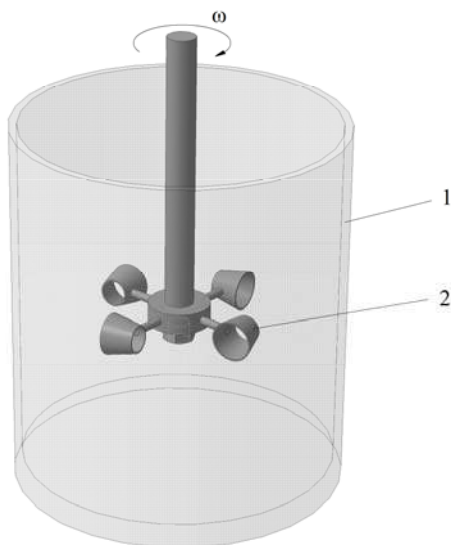


Рис. 1. Общий вид аппарата и мешалки трубками переменного сечения:
1 – аппарат; 2 – трубка переменного сечения

Поле скоростей в аппарате без внутренних устройств с вращающейся мешалкой является трехмерным и характеризуется окружной v_t , радиальной v_r и осевой v_z составляющей абсолютной скорости v . В аппаратах такого типа $v_t > v_r$ и $v_t > v_z$ и в рабочем пространстве имеет место окружной поток.

Изменение окружной скорости v_t по радиусу r можно описать на основе модели «комбинированного вихря Рэнкина» (рис. 2) и движение жидкости рассматривать в каждой зоне отдельно [1]. В зоне 1 при $r < a$ существует вихревое течение жидкости, а в зоне 2 при $r > a$ наблюдается безвихревое потенциальное течение [1].

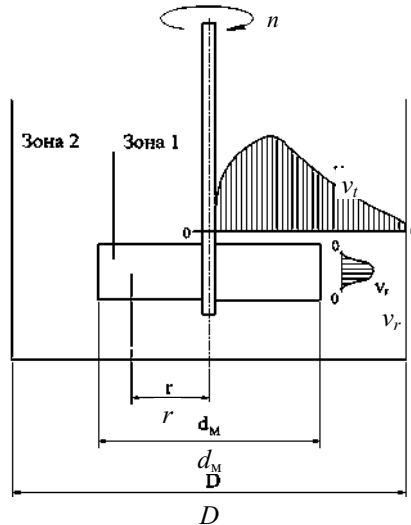


Рис. 2. Расчетная схема

Согласно теореме Стокса [1], элемент сечения ядра dS дает вклад в циркуляцию $d\Gamma$, равную

$$d\Gamma = \omega dS,$$

где ω – угловая частота вращения, с^{-1} .

Циркуляция по любому контуру, один раз охватывающему все ядро вихря, есть

$$\Gamma = \omega \cdot \pi \cdot a^2 = \text{const}, \quad (1)$$

где a – радиус вихря, м.

Поле скоростей, индуцированное N вихрями с непрерывным распределением [1], имеем

$$v_x - iv_y = \int \frac{d\Gamma}{2\pi i(z - z_0)} = \frac{\omega}{2\pi i} \int_S \frac{dS(z_0)}{z - z_0},$$

где v_x, v_y – компоненты скорости по осям x и y , м/с; z, z_0 – координаты по высоте вихря, м; i – комплексное число.

Учитывая аксиальную симметрию задачи, т.е. наличия только окружной компоненты скорости v_r и из теоремы Стокса для круга радиуса r имеем

$$2\pi \cdot r \cdot v_t = \pi \cdot a^2 \cdot \omega.$$

С учетом (1) окружная скорость в зоне 2

$$v_t = \frac{a^2 \cdot \omega}{2 \cdot r} = \frac{\Gamma}{2\pi \cdot r}.$$

Аналогично, в зоне 1

$$v_t = \frac{\Gamma \cdot r}{2\pi \cdot a^2}.$$

Данная модель приближена к реальности и может быть применена для описания движения жидкой среды в аппарате с мешалкой [1], но требует учета типа перемешивающего устройства. Уравнения, учитывающие тип мешалки, имеют вид [2]:

– для зоны 1 в диапазоне $0 \leq 2r \leq d_m$

$$v_t = 2\pi \cdot n \cdot r \left[\psi_1 \left(\frac{2r}{d_m} \right)^3 + \psi_2 \left(\frac{2r}{d_m} \right)^2 + 1 \right]; \quad (2)$$

– для зоны 2, где в диапазоне $d_m \leq 2r \leq D$,

$$v_t = 2\pi \cdot n \cdot d_m^2 (\psi_1 + \psi_2 + 1) \cdot \frac{1}{r}, \quad (3)$$

где n – частота вращения мешалки, с^{-1} ; r – текущий радиус, м; d_m – диаметр мешалки, м; ψ_1 и ψ_2 – параметры распределения скорости, связанные между собой зависимостью [4]

$$\psi_2 = -\Phi_1 - \Phi_2 \cdot \psi_1, \quad (4)$$

где Φ_1 и Φ_2 – коэффициенты, зависящие от типа мешалок и подбираемые опытным путем, для нашего случая по результатам собственных экспериментов $\Phi_2 = 1$ и $\Phi_1 = 0,9599$ [5].

Подставив в формулу (4) значения Φ_1 и Φ_2 , получим $\psi_1 = 1$ и $\psi_2 = -1,9599$.

Уравнения (2) и (3) описывают распределение скорости в объеме аппарата без учета движения жидкости в трубках переменного сечения. При движении трубки переменного сечения по окружности с частотой вращения n скорость на выходе из трубы определится по уравнению неразрывности [4]

$$v = \pi \cdot d_m \cdot n \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2}, \quad (5)$$

где d_1 и d_2 – входной и выходной диаметры отверстий трубки переменного сечения, м.

Уравнение (5) позволяет определять скорость движения жидкости только в поле вращения трубки. Для определения влияния вклада движения жидкости через трубку

переменного сечения на распределение скоростей во всем объеме аппарата с мешалкой, в уравнение (5) необходимо добавить коэффициент удаленности трубки переменного сечения от точки, где определяется скорость. Тогда уравнение (5) примет вид:

$$v = \kappa \cdot \pi \cdot d_m \cdot n \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2},$$

где κ – коэффициент удаленности конфузора от точки, в которой определяется скорость движения жидкости.

Коэффициент удаленности определяется по формуле [4]

$$\kappa = 1 - \left| \frac{r_m - r}{r_m} \right|,$$

где r_m – радиус мешалки, м.

Расчет параметров окружной скорости жидкости в аппарате с перемешивающим устройством без учета физических свойств движущейся среды реализован в среде MathCAD в соответствии с приведенными уравнениями при следующих входных параметрах: $d_m = 0,05$ м, $D = 0,15$ м, $d_1 = 0,03$ м, $d_2 = 0,01$ м, $n = 2,5$ с⁻¹. Распределение окружной скорости в аппарате с мешалкой приведено на рис. 3.

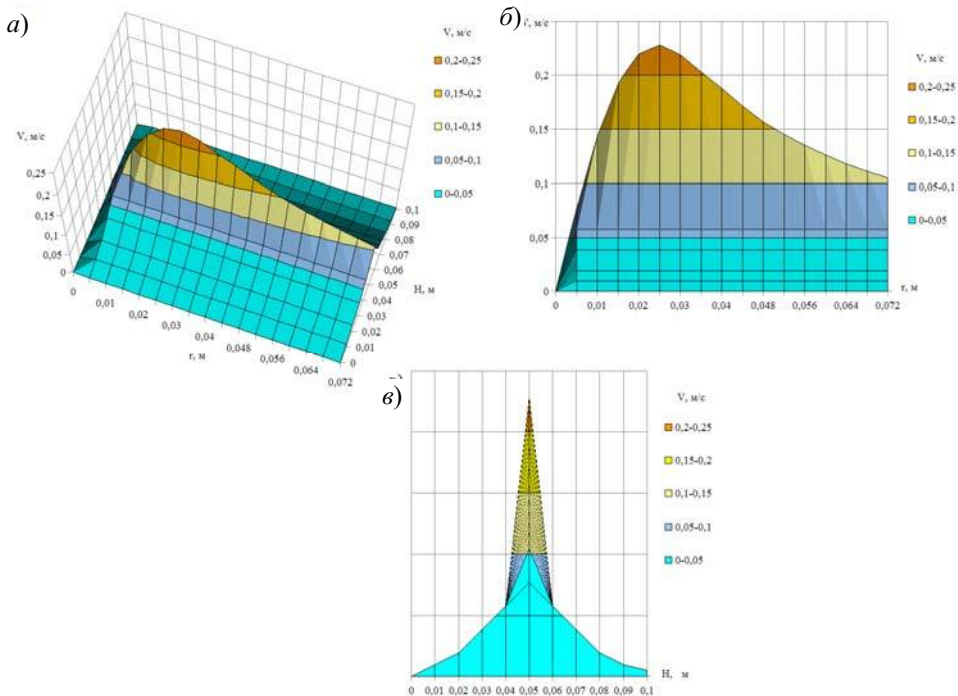


Рис. 3. Профиль окружной скорости жидкости в аппарате с мешалкой:
 а) в объеме аппарата; б) по радиусу аппарата; в) по высоте аппарата

Выводы

1. Разработана математическая модель распределения окружной скорости движения идеальной жидкости в аппарате, оснащённом мешалкой с конфузорами, где мешалка равномерно вращается относительно вертикальной оси рабочей камеры. Математическая модель реализована средствами вычислительного комплекса MathCAD в численной форме.

2. В ходе численного эксперимента определена зависимость окружной составляющей скорости движения жидкости в аппарате при входной скорости вращения $n = 2,5 \text{ с}^{-1}$ и получен профиль окружной скорости.

Литература

1. Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. 504 с.
2. Васильцов Э.А., Ушаков В.Г. Аппараты для перемешивания жидких сред. Л.: Машиностроение, 1979. 272 с.
3. Кожевников С.О. Обзор основных типов перемешивающих устройств для получения технологических жидкостей // Вестник научно-промышленного общества. Вып. 6. М.: АЛЕВ-В, 2003. С. 67–69.
4. Кожевников С.О. Определение конструктивных параметров перемешивающего устройства непрерывного действия // Вестник научно-промышленного общества. Вып. 19. М.: АЛЕВ-В, 2012. С. 8–12.
5. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. Л.: Химия, 1975. 384 с.

References

1. Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L. *Vvedenie v teoriiu kontsentrirrovannykh vihrei* [Introduction to the theory of concentrated vortices]. Novosibirsk: Institut teplofiziki SO RAN, 2003. 504 p.
2. Vasil'tsov E.A., Ushakov V.G. *Apparaty dlya peremeshivaniia zhidkikh sred* [Apparatus for mixing liquid media]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1979. 272 p.
3. Kozhevnikov S.O. Obzor osnovnykh tipov peremeshivayushchikh ustroystv dlia polucheniia tekhnologicheskikh zhidkostey [An overview of the main types of mixing devices for fluids]. *Vestnik nauchno-promyshlennogo obshchestva. Vyp. 6* [Bulletin of the scientific-industrial society. Issue 6]. Moscow: ALEV-V, 2003, pp. 67–69.
4. Kozhevnikov S.O. Opredeleniye konstruktivnykh parametrov peremeshivayushchego ustroystva nepreryvnogo deystviia [Determination of design parameters of a mixing device of continuous action]. *Vestnik nauchno-promyshlennogo obshchestva. Vyp. 19* [Bulletin of the scientific-industrial society. Issue 19]. Moscow: ALEV-V, 2012, pp. 8–12.
5. Strenk F. *Peremeshivaniye i apparaty s meshalkami* [Mixing and apparatus with mixers]. Leningrad: Himiya, 1975. 384 p.

Кожевников С.О., Блинов О.В., Ершов С.В., Кузнецов В.Б. Моделирование профиля окружной скорости жидкости в аппарате с мешалкой // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. №6 (81). С. 33–38.

For citation: Kozhevnikov S.O., Blinov O.V., Ershov S.V., Kuznetsov V.B. Simulation model of the profile of the circumferential speed of liquid in the apparatus with stirrer. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2017, no. 6 (81), pp. 33–38.