
МЕХАНИКА МАШИН

УДК 532.59

**ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЛОПАТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
В УСТАНОВКАХ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ТИПА**© 2019 г. Р. Ф. Ганиев¹, Д. Л. Ревизников^{1,2}, Т. Ю. Сухарев^{1,2,*}, Л. Е. Украинский¹¹ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*² *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия** e-mail: timur.suxarev@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.06.2018 г.

Принята к публикации 24.12.2018 г.

Рассматриваются процессы перемешивания в установках колебательного типа. Методами компьютерного моделирования исследуется влияние формы подвижного элемента на эффективность перемешивания. Одновременно оценивается мощность, потребляемая установкой. Применительно к рассматриваемым процессам вводятся числа подобия, позволяющие обоснованно подходить к масштабированию перемешивающих устройств данного типа.

Ключевые слова: волновое перемешивание, уравнения Навье–Стокса, численное моделирование, критерии качества смеси

DOI: 10.1134/S0235711919020068

Введение. Различного рода эффекты в динамике многофазных течений позволяют за счет малых возмущений волновой природы создать сильные дополнительные движения жидкости. При этом не требуется значительных затрат энергоресурсов [1–4]. В работах [5–8] были рассмотрены вопросы моделирования процессов волнового перемешивания в замкнутых емкостях, в осесимметричных проточных трактах с препятствиями. Был разработан и протестирован оригинальный метод для отслеживания положения примеси в пространстве. В последнее время все больший интерес вызывает перемешивание в установках колебательного типа. Конструкция таких устройств предполагает расположение внутри объема жидкости относительно небольшого профилированного тела (лопатки), которое совершает колебания с малой частотой и амплитудой. В статье [9], которая посвящена изучению волнового перемешивания в подобных установках, описана методика численного моделирования, дана оценка потребляемой мощности и проведен широкомасштабный параметрический анализ с целью определения оптимальных режимов работы с позиций “потребляемая мощность – эффективность перемешивания”. В работе [10] было показано, что использование нескольких одинаково спрофилированных лопаток, которые совершают колебания в одной фазе, позволяет существенно улучшить качество смеси. Был предложен подход к оптимальному размещению рабочих элементов в пространстве, который основан на отслеживании траекторий каждой частицы примеси. Все это создает условия для автоматизированного процесса проектирования волновых перемешивающих устройств.

В данной статье исследуется влияние геометрической формы рабочего элемента на эффективность перемешивания. Кроме того, рассматривается вопрос масштабирования

ния, который является актуальным при переходе от лабораторных стендовых установок к реальным производственным аппаратам.

Методы численного моделирования. Вычислительный эксперимент включает в себя три этапа: моделирование течения жидкости при наличии в потоке тела, совершающего колебательные движения; моделирование эволюции объема примеси в несущей среде и расчет критериев эффективности перемешивания.

Моделирование течения несущей среды, производится путем решения двумерных нестационарных уравнений Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где x, y – координаты, ρ – плотность жидкости, P – давление, μ – динамическая вязкость, u, v – компоненты скорости в направлениях x, y соответственно, t – время. Для решения системы (1) использовался пакет вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent, расширенный в данной работе с целью возможности расчета колебательных режимов. Согласование полей скоростей и давлений проводилось с использованием алгоритма PISO (Pressure Implicit with Splitting Operators). Для того чтобы не перестраивать заново расчетную сетку на каждом временном шаге, использовалась деформируемая сетка.

В начальный момент времени в расчетную область помещается некоторый объем примеси. Движение частиц примеси описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений (Лагранжев подход)

$$\frac{dX}{dt} = u(t, X, Y), \quad \frac{dY}{dt} = v(t, X, Y). \quad (2)$$

Здесь $u(t, X, Y), v(t, X, Y)$ – поля скорости, полученные из решения системы уравнений (1). Таким образом, рассматривается безынерционная примесь. Для расчета эволюции примеси применялся маркерный метод [6]. В данном методе частица-маркер представляет постоянный объем примеси. Конечное множество всех маркеров составляет начальный объем. На каждом временном шаге выполняется перенос каждого из маркеров полем скорости несущей среды согласно уравнению (2). Множество маркеров с новыми координатами образует объем примеси на следующем временном шаге.

Рассчитанное распределение примеси по объему позволяет оценить эффективность процесса перемешивания. К настоящему времени разработано достаточно большое количество разнообразных критериев оценки эффективности перемешивания [11]. В данной работе будем использовать критерии из работ [9, 10]. Эффективность перемешивания определяется посредством основного и дополнительного критериев. Расчетная область разбивается прямоугольной декартовой сеткой на ячейки. В качестве основного критерия выбирается процент заполнения частицами ячеек, составляющих исследуемую область: $I_1 = \frac{N}{N_0}$, где N_0 – общее число ячеек, N – количество

заполненных частицами ячеек. В качестве дополнительного критерия, характеризующего неравномерность распределения частиц по заполненным ячейкам, используется величина I_2

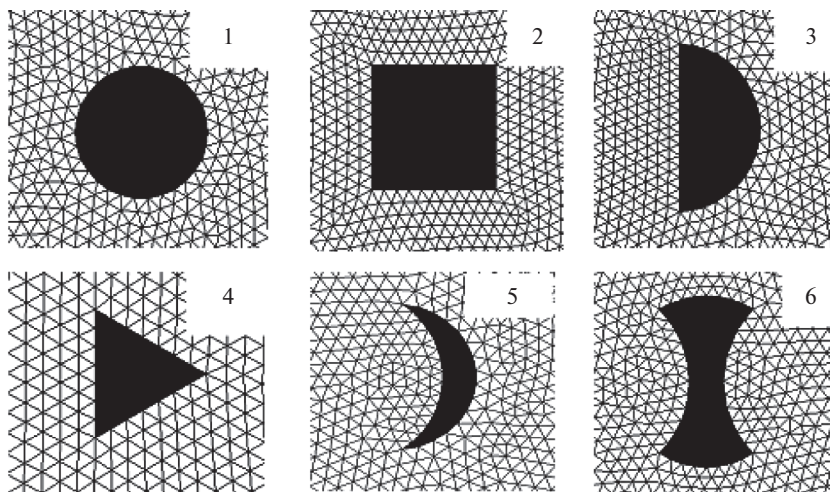


Рис. 1. Варианты геометрической формы лопаток.

$$I_2 = 1 - \frac{1}{1 + \alpha d}, \quad d = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - M)^2}, \quad M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i,$$

где X_i – количество частиц, находящихся в i -й “заполненной” ячейке, N – количество “заполненных” ячеек, M – среднее величины X_i , α – масштабирующий параметр равный $1/3$. При этом, в отличие от основного критерия, меньшее значение дополнительного критерия указывает на лучшее качество перемешивания.

Входные данные и начальные условия. В проведенной серии вычислительных экспериментов рассматривается следующая схема. Расчетная область представляет собой прямоугольник размерами 22×10 см, заполненный жидкостью (вода) с плотностью $\rho = 1000$ кг/м³ и динамической вязкостью $\mu = 10^{-3}$ Па · с. В данной области располагается примесь, состоящая из 500 тысяч частиц. На боковых и нижней границах прямоугольной области, а также на поверхностях лопаток, ставятся условия прилипания и непротекания ($u = 0, v = 0$), на верхней границе задается условие равенства статического давления атмосферному. В начальный момент времени среда находится в состоянии покоя, а частицы расположены пятном в правой нижней части области. Жидкость приходит в движение вследствие колебаний лопатки по синусоидальному закону. Рассматриваются 6 вариантов геометрических форм профиля лопатки (рис. 1). Все шаблоны получаются из варианта 1 диаметром 10 мм. Лопатка совершает колебания с амплитудой $a = 3.5$ мм и частотой $f = 30$ Гц.

Расчетная область заполняется треугольными ячейками. Шаг по времени $\Delta t = 0.001$ с. Для вычисления критериев перемешивания используется прямоугольная сетка размером 50×25 .

Влияние геометрического профиля лопатки. На рис. 2 приведены картины, которые соответствуют развитой стадии перемешивания, после совершения лопаткой 150 колебаний. Наблюдаемой картине соответствует основной критерий I_1 на рис. 3а. Дадим краткое описание каждому варианту. Как уже отмечалось в работе [9] динамику перемешивания можно разделить на 2 этапа: “процесс затягивания примеси” и собственно перемешивание. Для круглого профиля перемешивание практически отсутствует. Характерен очень долгий процесс “затягивания” частиц (около 3–4 с). Это можно объяснить симметрией профиля и его хорошей обтекаемостью: образуется очень мало

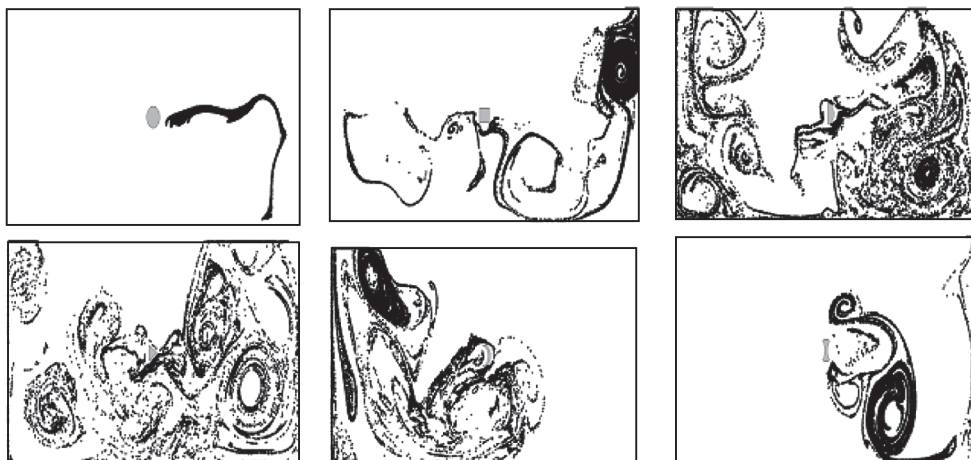


Рис. 2. Распределение частиц в пространстве при $t = 5$ для всех вариантов. Расположение вариантов аналогично рис. 1.

вихревых структур, способных увлечь за собой частицы. Для вариантов 2, 6 характерно что процесс происходит как в левой части области, так и в правой, но из-за симметрии и плохой обтекаемости профиля с течением времени частицы начинают скапливаться около боковых стенок. Вариант 5 обсуждался подробно в предыдущих работах, поэтому не будем останавливаться на его описании. Наибольший интерес вызывают варианты 3 с полукруглым профилем и 4 с треугольным, так как за относительно короткий промежуток времени частицы заполняют больше 75% области. При этом полукруглый вариант обладает значительно большим темпом. Также существенным отличием является то как происходит перемешивание. В ходе колебательного процесса область заполняют вихревые образования, которые и участвуют в транспортировке частиц по пространству. Для треугольного профиля характерно наличие в поле течения многих мелких вихрей малой интенсивности, а для полукруглого варианта – небольшое количество вихрей большей интенсивности. Данное явление также объясняет более высокий темп перемешивания у варианта 3, т.е. время процесса “затягивания” частиц значительно меньше.

Дополнительно была рассчитана потребляемая мощность установки для преодоления гидродинамической силы сопротивления. Для определения данной силы в каждый момент времени проводилось интегрирование вдоль поверхности рабочего элемента касательного трения и давления. С учетом скорости лопатки определялась средняя мгновенная мощность за период колебаний. Также была проведена оценка среднего значения критериев L_1^* без учета начального этапа “затягивания” частиц. На основании расчетных данных на рис. 3б была построена карта режимов в плоскости “потребляемая мощность–эффективность перемешивания”.

Обобщая полученные результаты, можно утверждать, что наихудший результат качества смеси достигается при использовании профилей симметричных относительно прямой, перпендикулярной направлению колебаний рабочего элемента. На основании оценок эффективности перемешивания на рис. 3а можно отдать предпочтение варианту 3 (полукруглый профиль), однако, с точки зрения потребляемой мощности (рис. 3б) более эффективным является вариант 4 (треугольный профиль).

Масштабирование. При изучении данного вопроса были использованы два числа подобия из механики жидкости и газа, которые были преобразованы с целью описа-

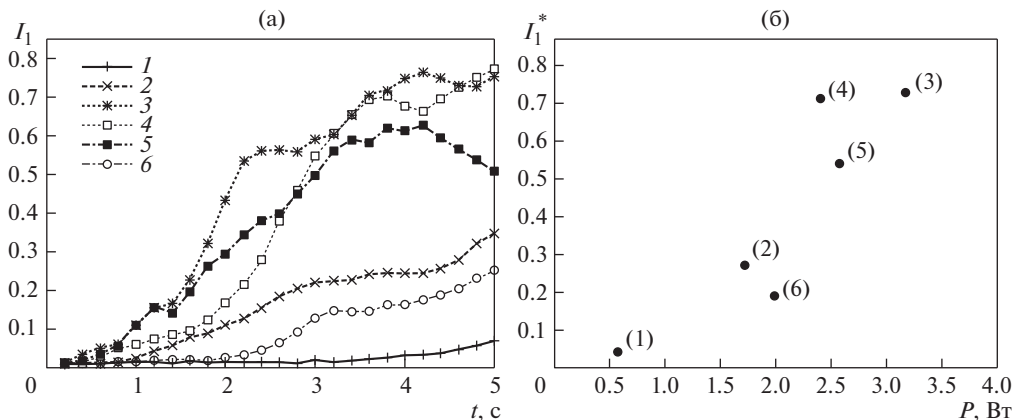


Рис. 3. (а) – критерии качества перемешивания I_1 . Нумерация кривых соответствует номерам вариантов; (б) – карта режимов в плоскости “эффективность перемешивания–потребляемая мощность”. Нумерация маркеров соответствует номерам вариантов.

ния процессов волнового перемешивания. Число Рейнольдса, где в классическом случае скорость заменяется произведением частоты и амплитуды, а характерная длина – на отношение площади установки к амплитуде, имеет место следующее выражение

$$\text{Re} = \frac{f\rho L_x L_y}{\mu}, \quad (3)$$

где L_x, L_y – это соответствующие размеры установки по осям x, y . Аналогичным образом вводится число Струхала

$$\text{St} = \frac{L_x L_y}{a^2}. \quad (4)$$

Для проверки правильности введенных критериев, проведем вычислительный эксперимент. Возьмем стандартную форму лопатки (вариант 5) и увеличим расчетную область и размер лопатки пропорционально в два раза. При этом числа Re, St для данного варианта такие же, как и в рассмотренном выше случае. Отсюда следует, что амплитуда должна увеличиться в 2 раза, а частота уменьшиться в 4 раза для получения подобного течения в укрупненном перемешивающем устройстве. Проведем расчет с новыми параметрами: размер области 44×20 см, размер лопатки пропорционально увеличивается в 2 раза, $a = 7.0$ мм, $f = 7.5$ Гц. На рис. 4 представлены результаты расчета совместно с результатами для стандартного размера области. Так как два процесса имеют разные частоты, то для сравнения на оси X откладывается число колебаний рабочего элемента K . По результатам можно утверждать, что присутствует физическое подобие [12], определяемое критериями (3), (4).

Выводы. В заключение отметим, что процессы волнового перемешивания характеризуются сложным распределением скоростей в объеме жидкости, которое, как было показано в предыдущих работах, зависит от частотно-амплитудных характеристик рабочих элементов. В данном исследовании было продемонстрировано, что большое влияние на эффективность перемешивания оказывает также и геометрическое профилирование лопатки. С этой целью была построена соответствующая карта режимов. Применительно к рассматриваемым процессам волнового перемешивания вве-

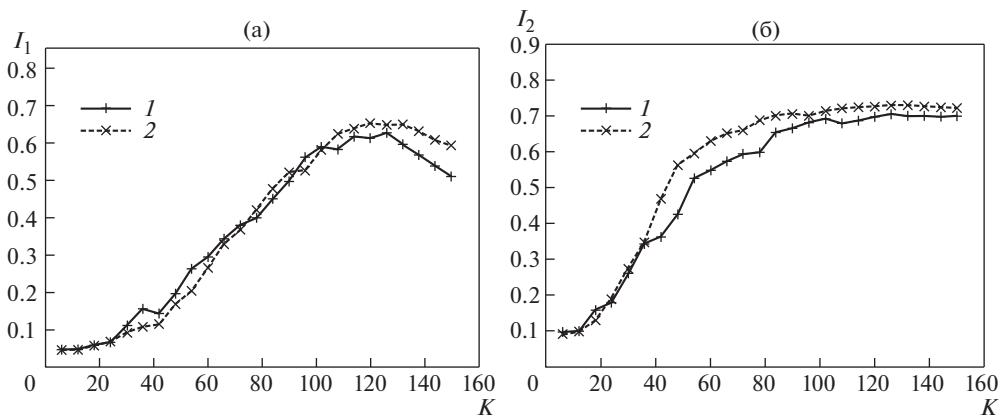


Рис. 4. (а) – критерии качества перемешивания I_1 : 1 – стандартный размер установки, 2 – размер установки пропорционально увеличен в 2 раза; (б) – критерии качества перемешивания I_2 : 1 – стандартный размер установки, 2 – размер установки пропорционально увеличен в 2 раза.

дены числа подобия, что позволяет обоснованно подходить к масштабированию установок колебательного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. Л.: Химия, 1984, 336 с.
2. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2011. 780 с.
3. Панин С.С. Разработка волнового смесителя для перемешивания высоковязких неньютоновских жидкостей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 2. С. 61–70.
4. Артамонов В.Ю., Ганиев С.Р., Кузнецов Ю.С., Пустовгар А.П., Султанов Д.Р., Шмырков О.В. Лабораторные и промышленные исследования волновых машин и аппаратов для приготовления тонкодисперсных суспензий // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 1. С. 109–117.
5. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Украинский Л.Е. Волновое перемешивание // Нелинейная динамика. 2008. Т. 4. № 4. С. 483–496.
6. Винников В.В., Ганиев К.О., Ревизников Д.Л., Украинский Л.Е. Дипольный метод для моделирования процессов перемешивания // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 2. С. 122–130.
7. Ottino J.M. Mixing, Chaotic Advection and Turbulence // Annu. Rev. Fluid Mech. 1990. № 22. P. 207–254.
8. Ottino J.M. The Mixing of Fluids // Scientific American. 1989. V. 260. № 1. P. 56–67.
9. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Волновое перемешивание в установках колебательного типа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 3. С. 5–10.
10. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Оптимизация пространственного расположения рабочих элементов в установках колебательного типа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 1. С. 3–8.
11. Мелешко В.В., Краснополская Т.С. Смешивание вязких жидкостей // Нелинейная динамика. 2005. Т. 1. № 1. С. 69–109.
12. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1981. 440 с.