

Волновое перемешивание

Р. Ф. Ганиев, Д. Л. Ревизников, Л. Е. Украинский

Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН

Получено 26 мая 2008 г.

Работа посвящена исследованию процессов волнового перемешивания в плоских и осесимметричных проточных трактах. На основе оригинального дипольного метода разработан эффективный аппарат математического моделирования рассматриваемых процессов. С помощью широкомасштабного вычислительного эксперимента обоснована возможность получения однородных смесей без использования подвижных механических частей, в частности, за счет перемешивания в интенсивных вихревых дорожках за препятствиями. Показана перспективность применения осесимметричных проточных трактов с тангенциальной закруткой потока.

Ключевые слова: волновое перемешивание, вихревые дорожки, гомогенизация смесей, численные методы, дипольный метод

R. F. Ganiev, D. L. Reviznikov, L. E. Ukrainsky

Wave mixing

The paper studies wave-mixing processes in plane and axisymmetric flowing channels. Basing on the original dipole method we suggest an efficient approach to mathematical modeling of such processes. Extensive simulations show that instead of traditional mechanical mixers homogeneous mixtures can be produced in the intense vortex wakes downstream of a body. The paper shows that axisymmetric tangential swirl channels hold much promise.

Keywords: wave stirring, vortex streets, admixture homogenization, numerical methods, dipole method

Mathematical Subject Classifications: 37A17, 74E05, 76D17, 76F25

Введение

Технологии гомогенизации смесей являются неотъемлемой частью производственных циклов во многих отраслях промышленности. Процессы перемешивания обусловлены сложными многомасштабными физическими явлениями, такими как конвективный перенос, поверхностное натяжение, турбулентность, кавитация и молекулярная диффузия.

Разработка оптимальных технологий перемешивания начинается с изучения свойств потоков несущей среды в проектируемой перемешивающей установке, поскольку качество получаемой смеси в первую очередь зависит от структуры течения. В фундаментальной работе [1] представлено развернутое аналитическое исследование волновой динамики вихревых образований, наблюдаемых в спутных течениях. Моделирование следов точечными вихрями показало, что задача адвекции трех вихрей на бесконечной плоскости порождает топологический хаос. Это, в частности, выражается в непрерывном взаимодействии всех вихрей. В работах [2, 3] проведена классификация особых точек в фазовом пространстве и показано, что реализация течением топологического хаоса благоприятствует эффективному перемешиванию. Так, в работе [3] экспериментально исследовано перемешивание в двумерных замкнутых емкостях, а в [2] дополнительно рассмотрены трехмерные течения в проточных трактах. Работа [4] посвящена методологии исследования ламинарного смешивания в замкнутых емкостях, включая обзор часто используемых критериев эффективности перемешивания и подробное алгоритмическое описание численных методов моделирования динамики пятна примеси. В работе [5] представлены результаты численного моделирования двумерной установки с подвижными частями. Обоснование возможности достижения топологического хаоса стационарными течениями в трехмерных проточных трактах приводится в работах [6, 7].

В настоящей работе рассмотрены плоские и осесимметричные вихревые генераторы, осуществляющие перемешивание в макроскопическом масштабе. Показано, что способность к перемешиванию для течения в проточном тракте можно характеризовать распределением общей энергии по вихревым структурам в реализующемся диапазоне масштабов. Определяющим фактором при этом является расстояние между вихревыми структурами, отнесенное к размеру самих структур. Предложен подход к повышению эффективности перемешивания с помощью размещения препятствий, разбивающих крупные вихревые структуры, что дает существенное повышение качества смеси на выходе из проточного тракта.

Математическое моделирование процессов перемешивания

Изучение процессов перемешивания жидкостей состоит из двух больших разделов: перемешивание жидкостей в замкнутых емкостях и перемешивание жидкостей в проточных трактах. Постановка прямой задачи является общей для обоих случаев и заключается в расчете критерия перемешивания в известном нестационарном поле скорости при подаче примеси в заданный участок моделируемой области. Несмотря на единую постановку задачи, численные методы решения в зависимости от выбранного раздела имеют свои индивидуальные особенности. Задачи о перемешивании в проточных трактах представляются более сложными, поскольку постоянство расхода примеси соблюдается здесь только в интегральном смысле.

На первом этапе вычислительного эксперимента применяются численные методы и алгоритмы, моделирующие эволюцию объема примеси в несущей среде. Рассматриваются лагранжевы методы переноса примеси течением, поскольку использование эйлеровых переменных приводит к схемным ошибкам, прогрессирующим со временем расчета [8].

Моделирование течения несущей несжимаемой жидкости в перемешивающем устройстве производится путем решения нестационарных уравнений Навье–Стокса:

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

В начальный момент времени в расчетную область помещается объем примеси. Движение каждой точки примеси задается системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

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

Здесь $u(t, X, Y, Z)$, $v(t, X, Y, Z)$, $w(t, X, Y, Z)$ — поля скорости, полученные из решения системы уравнений (1).

Геометрическая форма объема примеси аппроксимируется упорядоченным набором маркеров. Физический смысл маркера зависит от используемого метода отслеживания эволюции примеси.

В маркерном 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. Множество маркеров с новыми координатами образует объем примеси на следующем временном шаге. Маркерный метод является исторически первым методом, он активно используется для визуализации траекторий при анализе сложных течений. Положительными сторонами маркерного метода является простота алгоритма и экономичность по затратам вычислительных ресурсов, включая экономичность вычисления критериев эффективности перемешивания. Отрицательной стороной оказывается сравнительно низкая точность получаемого решения, в силу невозможности точного соблюдения геометрических законов сохранения в малом объеме вычислительной области.

Контурный метод предусматривает слежение только за границей плоского пятна, которая аппроксимируется замкнутой кусочно-линейной кривой, построенной по конечному упорядоченному набору точечных маркеров. В общих чертах базовый алгоритм контурного метода изложен в работах [4], [5]. Поскольку контур пятна может менять длину и локальную кривизну, в алгоритме предусмотрена возможность добавления и удаления маркеров для достижения требуемой точности аппроксимации и экономии вычислительных ресурсов соответственно. Контурный метод считается наиболее точным. Достоинством контурного метода является выполнение геометрических законов сохранения для пятна примеси как для замкнутых емкостей, так и для проточных трактов. К недостаткам контурного метода относят экспоненциальный рост числа маркеров по ходу расчета и сложность обобщения на трехмерный случай. При моделировании процессов перемешивания в проточных трактах, в отличие от замкнутых емкостей, применение контурного метода ограничено из-за быстрорастущих затрат машинного времени на расчет пятна в состоянии развитого перемешивания. Обычно контурный метод используется в качестве эталона для оценки критериев перемешивания, получаемых альтернативными методами.

В настоящей работе предлагается дипольный метод, сочетающий в себе достоинства контурного и маркерного методов. В дипольном методе, являющемся развитием маркерного метода, объем примеси представляется множеством кубических маркеров со стороной h_0 . В начальный момент времени каждый маркер имеет такой объем $V_0 = h_0^3$, что суммарный объем маркеров должен соответствовать начальному объему примеси. В отличие от классического маркерного метода, независимыми элементами являются не отдельные маркеры, а диполи. Каждый диполь состоит из двух маркеров и характеризуется плечом l_0 , равным расстоянию между центрами этих двух маркеров. Угловая ориентация диполей в начальный момент времени выбирается, исходя из максимально плотного заполнения непересекающимися маркерами исходного объема примеси. Вследствие эволюции примеси в нестационарном поле течения, плечо диполя d_i будет переменной величиной $l_i(t)$. В момент времени t^* , когда плечо $l_i(t^*)$ достигнет или превысит некоторый максимальный порог l_{MAX} , произойдет расщепление диполя пополам. Будут образованы два новых диполя d_j, d_k с плечами $l_j(t^*) = l_k(t^*) = (0.5 - \varepsilon)l_i(t^*)$, где ε — малая величина, обеспечивающая несовпадение маркеров новых диполей. При этом суммарный объем двух «новых» диполей d_j, d_k должен равняться объему «старого» диполя d_i . Объем каждого маркера в «новых» диполях будет равен $V_0/2$. Можно отметить, что дипольный метод обладает резервом для повышения производительности благодаря контролю над расщеплением диполей. Если определить порог расщепления как некоторый минимально допустимый объем маркера, то все диполи, состоящие из маркеров объемом, меньшим или равным этому порогу, не будут подлежать дальнейшему делению. Дипольный метод естественным образом обобщается на случай использования в качестве элементов геометрических примитивов более высокого порядка. Например, вместо диполей можно использовать разомкнутые цепочки или многогранники с аналогичными правилами расщепления.

Второй этап вычислительного эксперимента заключается в расчете критериев эффективности перемешивания. В каждый момент времени критерий является скалярной величиной и отражает мгновенное распределение примеси в заданной подобласти. Обычно ожидается, что с увеличением временного интервала перемешивания будет расти и качество гомогенизации. В силу статистической природы критерий не будет меняться монотонно. Также общепризнанна зависимость величины критерия от расчетной сетки [4].

Для оценки эффективности перемешивания используется набор критериев, большинство которых основано на статистических моментах первого и второго порядка. Численные методы определения критерия различаются для замкнутых емкостей и проточных трактов.

В случае замкнутых емкостей входными данными служит только геометрическая информация об области с примесью. Как правило, критерии рассчитываются на равномерной декартовой сетке, разбивающей всю расчетную область на N_δ одинаковых ячеек. В n -ой ячейке вычисляется грубая плотность распределения D_n , равная доли объема ячейки, занимаемой примесью $D_n = V_n/V_\delta$, где V_n — объем, занимаемый примесью в ячейке, V_δ — полный объем ячейки.

Основные критерии качества смеси описаны, например, в работах [3, 4]. В настоящей работе для замкнутых емкостей использовался критерий интенсивности сегрегации, задаваемый следующими выражениями:

$$I = \frac{1}{\langle D \rangle (1 - \langle D \rangle)} \cdot \frac{1}{N_\delta} \sum_{n=1}^{N_\delta} (D_n - \langle D \rangle)^2, \text{ где } \langle D \rangle = \frac{1}{N_\delta} \sum_{m=1}^{N_\delta} D_m.$$

В случае проточных трактов рассмотрение всей расчетной области нецелесообразно, поскольку интенсивное перемешивание осуществляется лишь в зоне вихревых дорожек. Критерий эффективности перемешивания желательно рассчитывать по одномерному поперечному сечению позади зоны вихревых дорожек или непосредственно у выхода из тракта.

Процессы перемешивания в проточных трактах, как правило, подразумевают постоянную подачу примеси в течение. Объем примеси меняется по мере того, как примесь поступает или покидает тракт, а стандартный критерий интенсивности сегрегации не учитывает величину расхода примеси через выходное сечение тракта. Величины, полученные с помощью этого критерия, могут не выражать реальный показатель качества перемешивания. Для учета особенностей перемешивания в проточных трактах предлагается использовать критерий D_Q , основанный на величине расхода примеси, отнесенного к расходу жидкости через единичную площадку выходного сечения за заданный временной интервал:

$$Q_i = \frac{V_i}{q_i}, \quad M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i, \quad \sigma_Q = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - M)^2}, \quad D_Q = 1 - \frac{1}{1 + \alpha \cdot \sigma_Q},$$

где V_i — объем маркеров, прошедших через элементарную площадку за время δt , q_i — соответствующий расход жидкости, Q_i — безразмерный расход смеси за время δt , n — число элементарных площадок в исследуемом сечении, M — математическое ожидание величины Q_i , $\alpha = 1/3$ — масштабирующий параметр.

Представленные численные методы и алгоритмы реализованы в виде программного комплекса с развитыми средствами визуализации, предназначенного для моделирования процессов гомогенизации в замкнутых емкостях и проточных трактах.

Перемешивание в замкнутой емкости

Рассматривается задача о перемешивании в плоской прямоугольной каверне с подвижными дном и крышкой. В работах [2, 3] были приведены результаты натурного эксперимента, близкого к данной задаче.

Расчетная область представляет собой прямоугольную каверну размерами 2×1 (см. рис. 1). Скорости крышки и дна равны по модулю и противоположны по направлению. Движение верхней и нижней границ осуществляется попеременно, согласно разрывному протоколу перемешивания с периодом $T = 15$. В каждом из полупериодов течение полагается стационарным. Смена полей скорости осуществляется мгновенно, в пренебрежении инерционными эффектами.

Обезразмеривание двумерных уравнений Навье–Стокса проводилось по высоте каверны и скорости движения крышки. Уравнения Навье–Стокса с соответствующими граничными условиями решались численно по методике, изложенной в [9]. Дифференциальные уравнения переноса в лагранжевых переменных решались численно, с помощью набора методов Рунге–Кутты различного порядка точности.

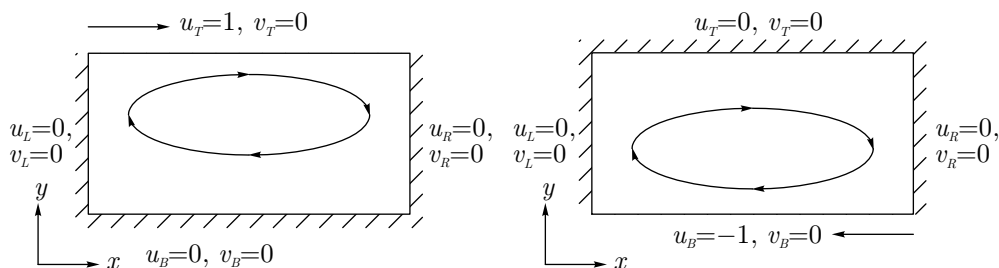
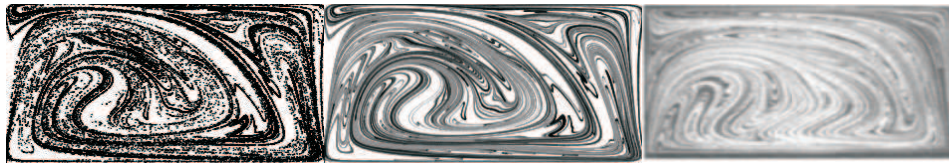


Рис. 1. Расчетная область и краевые условия для задачи о перемешивании в каверне

Для моделирования процесса перемешивания в область помещалось круглое пятно радиусом 0.125. Процесс перемешивания зависел от исходного положения пятна примеси. Приведенные результаты расчетов соответствуют координатам центра исходного пятна, равным (1.75, 0.25). Картины эволюции контура пятна отражают основные механизмы, приводящие к перемешиванию, а именно: вытягивание в нити и образование складок, что показано на рис. 2.



$t=59$. Маркерный метод $t=59$. Дипольный метод Эксперимент [2,6]

Рис. 2. Картина развитой стадии перемешивания

Наилучшую аппроксимацию контура на этапах развитого перемешивания обеспечивает контурный метод, в котором для адекватного разрешения таких особенностей контура требуется значительное число маркеров, растущее по экспоненциальному закону. Это приводит к экспоненциальному росту затрат машинного времени при моделировании перемешивания контурным методом. Для маркерного метода характерен линейный рост затрат машинного времени, поскольку число маркеров в области постоянно. Дипольный метод оказывается более затратным, чем маркерный, но менее затратным, чем контурный метод. Преимущество дипольного метода над контурным во многом определяется значением порога расщепления диполя. При низком значении этого параметра дипольный метод по своим характеристикам находится ближе к маркерному. Высокий порог расщепления приближает свойства дипольного метода к контурному.

Перемешивание в плоских волновых генераторах

Рассматривается плоский проточный тракт с рядом препятствий для осуществления волнового перемешивания. Подача примеси в тракт производится через заданное одномерное сечение в расчетной области. Непрерывно поступающая примесь представляется двумерным односвязным пятном. Движение каждой точки пятна задается двумя обыкновенными дифференциальными уравнениями из системы (2), решаемыми численно.

Основываясь на данных вычислительных экспериментов, в проточном тракте можно выделить три характерные зоны. Первая — зона подачи основной жидкости, вторая зона — зона вихревых дорожек, третья зона — зона выброса полученной смеси. Первая и третья зоны характеризуются безвихревым или слабовихревым характером движения жидкости. Во второй зоне, напротив, развиваются вихревые течения, от интенсивности и масштаба которых зависит качество получаемой смеси. В работе [1] аналитически показано, что динамика вихревых структур в спутном следе имеет волновую природу.

Нестационарные поля течения в проточных трактах были получены с помощью пакета вычислительной гидродинамики «OpenFOAM». Расчеты проводились на неструктурированных тетраэдральных сетках по математическим моделям ламинарного и турбулентного течений.

В каждом из трактов течение моделировалось на длительном временном интервале с целью исключить влияние переходных режимов численных схем расчета. Последующее моделирование движения и деформации пятна с примесью осуществлялось тремя различными методами: контурным, маркерным и дипольным.

По результатам расчетов из сорока шести имеющихся вариантов был составлен набор представительных примеров, наглядно демонстрирующих зависимость качества перемешивания от размеров препятствий и их расположения внутри тракта.

Рассматриваемые тракты имеют следующие геометрические размеры: максимальная ширина 0.2 м, длина 0.9 м. Внешние стенки трактов имеют одинаковую геометрическую форму, приведенную на рис. 3.

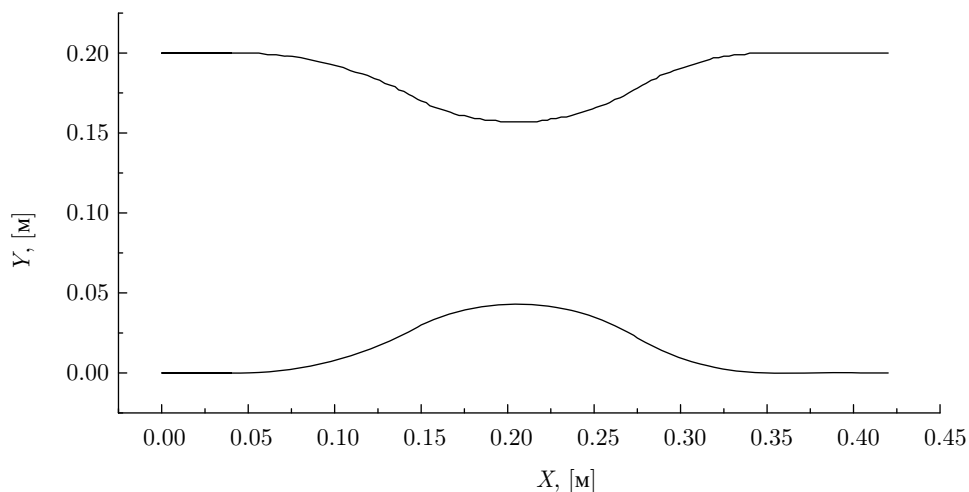


Рис. 3. Геометрическая форма внешних стенок начального участка трактов №1–№3

Внутренние препятствия представлены в трех вариантах:

1) Тракт №1. Первый ряд из двух цилиндров диаметром 0.026 м и второй ряд из трех цилиндров диаметром 0.02 м.

2) Тракт №2. Первый ряд из двух цилиндров диаметром 0.026 м и второй ряд из пяти цилиндров диаметром 0.02 м.

3) Тракт №3. Поперечная пластина шириной 0.05 м.

Скорость во входном сечении равняется 15.0 м/с. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 4–6. Представлены поля завихренности (а) и мгновенные картины перемешивания (б).

Анализ рассчитанных нестационарных полей скорости в трактах №1–3 показал, что после завершения переходного этапа течение в области вихревых дорожек имеет периодическую зависимость по времени. Подобный характер течений наблюдался как в ламинарном, так и в турбулентном случае. Включение турбулентной вязкости в соответствующие уравнения движения приводило к подавлению интенсивности вихревых дорожек, вплоть до полного их исчезновения.

Для контурного метода с добавлением стохастических турбулентных пульсаций в уравнения переноса маркеров наблюдалось увеличение длины контура и, как следствие, существенный рост числа маркеров, необходимых для его описания. При этом пульсации не оказывали влияние на площадь пятна. Аналогичные результаты были получены для маркерного и дипольного методов. Это дает основания утверждать, что турбулентность, в рамках описания существующими математическими моделями, не способствует крупномасштабному перемешиванию.

Исследование динамики критерия перемешивания выявило зависимость между течением в вихревом следе и эволюцией критерия. Так, критерий перемешивания в рассмотренных трактах тоже являлся периодическим, что свидетельствует о волновом механизме перемешивания. Для трактов №1–№3 временные периоды критерия составили 0.477 с, 0.235 с и 0.643 с соот-

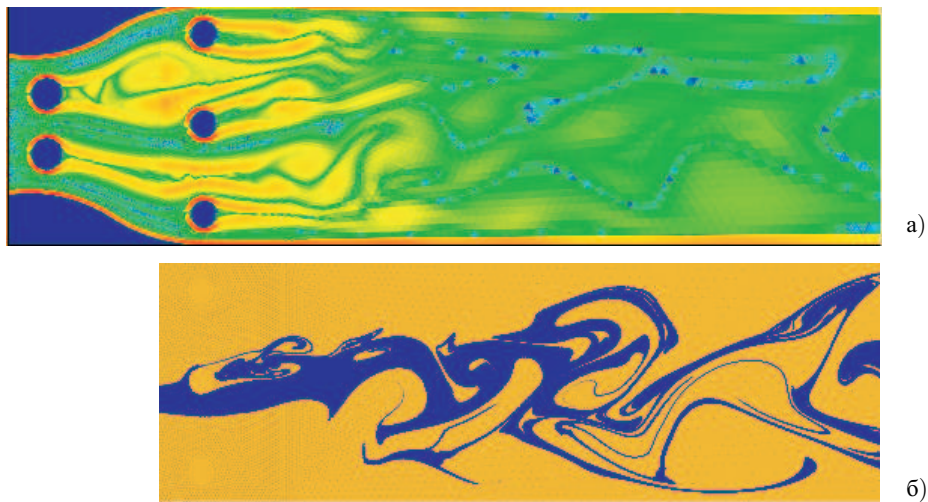


Рис. 4. Поле завихренности (а) и картина перемешивания (б) в тракте №1

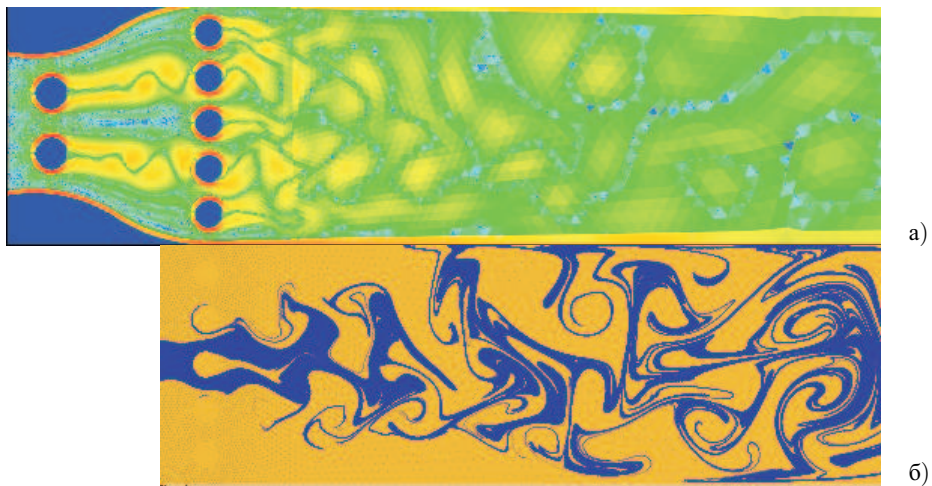


Рис. 5. Поле завихренности (а) и картина перемешивания (б) в тракте №2

ветственно. Усредненные по периоду критерии качества перемешивания оказались равны 0.611, 0.483 и 0.583.

В результате сравнения критериев перемешивания было получено, что предпочтительным является использование тракта №2. Установка во второй ряд препятствий пяти цилиндров дает более высокую скорость течения жидкости между цилиндрами и более интенсивную вихревую дорожку за ними, по сравнению с тремя цилиндрами во втором ряду препятствий. Кроме того, в тракте №1 крайние цилиндры второго ряда расположены близко к внешней стенке и не участвуют в разбиении основного потока.

Тракт №3, вопреки хорошей визуальной картине перемешивания, уступает по интегральному критерию качества тракту №2. Это можно объяснить более крупным масштабом вихревых структур, приводящих к большей неравномерности расхода жидкости по времени, что в итоге влечет большие вариации критерия перемешивания в последовательные моменты времени. Подобные колебания ухудшают интегральный критерий, несмотря на то, что за один временной период значения мгновенного критерия качества для тракта №3 опускается ниже отметки 0.4 чаще,

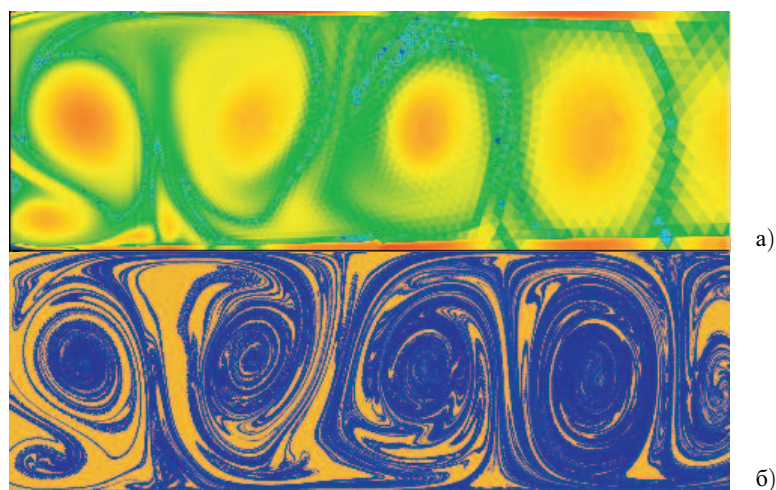


Рис. 6. Поле завихренности (а) и картина перемешивания (б) в тракте №3

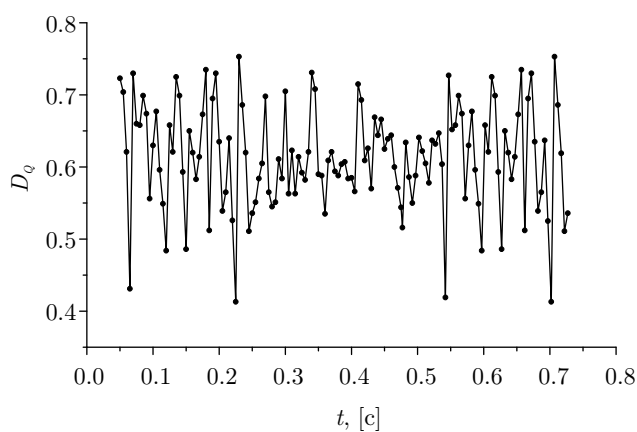


Рис. 7. Динамика критерия перемешивания в тракте №1

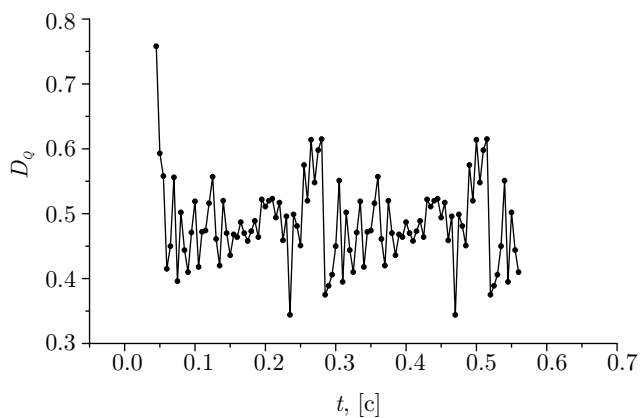


Рис. 8. Динамика критерия перемешивания в тракте №2

чем для тракта №2. Основным недостатком тракта с поперечной пластиной является то, что примесь, попавшая в окрестность центра вихревой структуры, перемешивается сравнительно плохо.

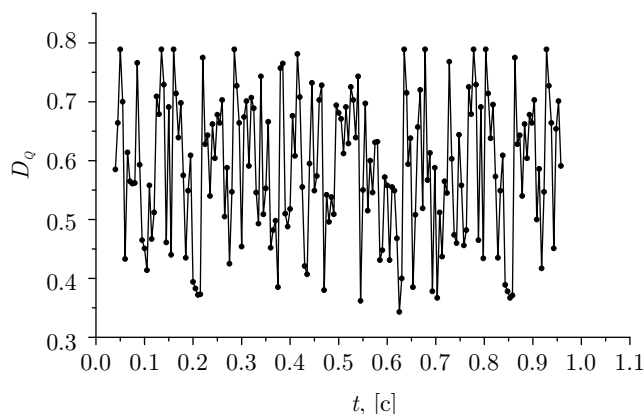


Рис. 9. Динамика критерия перемешивания в тракте №3

Визуальное сопоставление динамических картин перемешивания и полей завихренности показало, что движение и деформация пятна с примесью напрямую связана с эволюцией вихревых структур. Эволюцию вихря в вязкой среде можно разделить на два этапа. Первый этап — перенос вихря с медленной периферической диссипацией своей структуры. Второй этап — распад вихря. На первом этапе для вихря характерно наличие ярко выраженного центра вращения. Движение несущей среды в окрестности центра удовлетворяет критериям классификации особых точек, а сам центр является эллиптической точкой, что негативно влияет на качество перемешивания в её окрестности. На рис. 10 показана динамическая картина эволюции пятна примеси в окрестности центра вихревой структуры, являющейся эллиптической точкой.

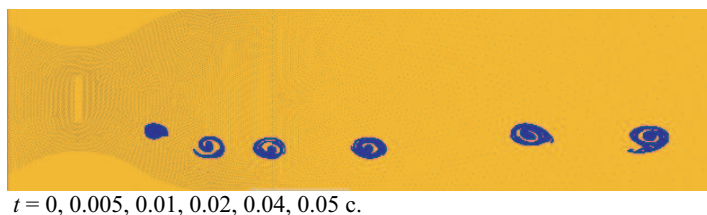


Рис. 10. Эволюция малого пятна в окрестности центра вихревой структуры для тракта №3

В настоящей работе предлагается способ оптимизации технологий перемешивания путем установки преград на пути эллиптической точки для разрушения крупного вихря с возможным образованием вихрей меньшего масштаба. Эффект дробления крупных вихревых структур показан на следующем примере.

Тракты имеют следующие геометрические размеры: максимальная ширина 0.036 м, минимальная ширина 0.022 м, длина 0.189 м. Скорость во входном сечении равняется 12.0 м/с. Препятствие представлено в двух вариантах:

- 1) тракт №4. Первый ряд из двух цилиндров диаметром 0.006 м и второй ряд из четырех цилиндров диаметром 0.006 м;
- 2) тракт №5. Первый ряд из одного цилиндра диаметром 0.012 м и второй ряд из двух цилиндров диаметром 0.012 м.

Геометрическая форма начального участка трактов приведена на рис. 11–12. Поля завихренности и картина перемешивания показаны на рис. 13–14.

Исследование динамики критерия качества перемешивания для трактов №4, №5 (см. рис. 15–16) не выявило периодического поведения течения за рассмотренные интервалы вре-



Рис. 11. Геометрия начального участка проточного тракта №4



Рис. 12. Геометрия начального участка проточного тракта №5

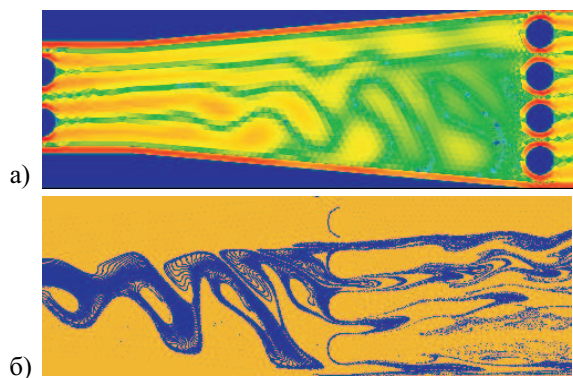


Рис. 13. Поле завихренности (а) и картина перемешивания (б) в тракте №4

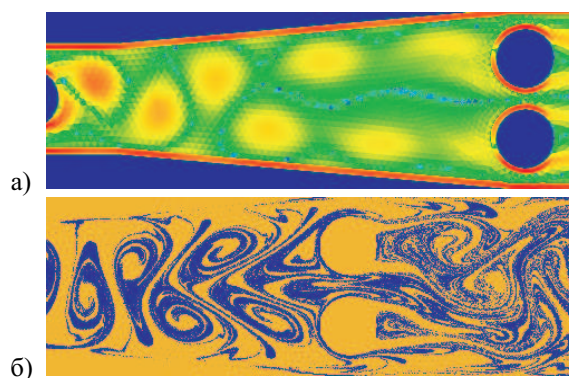


Рис. 14. Поле завихренности (а) и картина перемешивания (б) в тракте №5

мени. Из-за отсутствия периодичности усреднение критериев проводилось по всему временному интервалу.

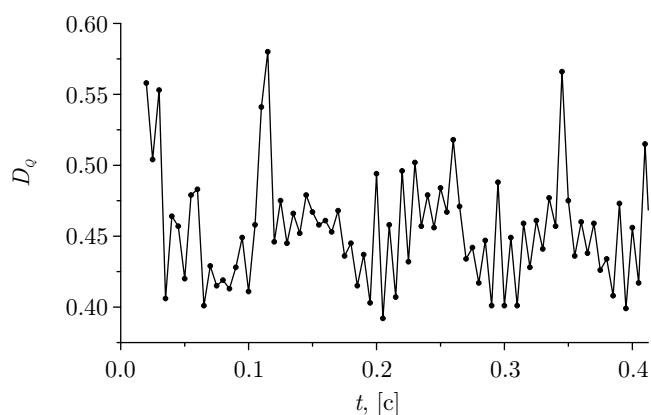


Рис. 15. Динамика критерия перемешивания в тракте №4

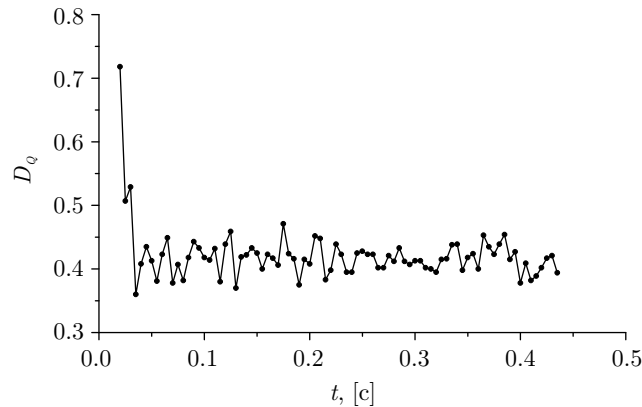


Рис. 16. Динамика критерия перемешивания в тракте №5

Усредненные критерии качества перемешивания оказались равны 0.454 и 0.417 соответственно. Сравнение критериев показало, что предпочтительнее использовать тракт №5, в котором проявляется эффект дробления крупных вихревых структур.

Перемешивание в цилиндрических волновых генераторах с закруткой потока

На практике для проточного перемешивания часто используются цилиндрические тракты. В отличие от плоских трактов в трехмерном случае эффективное перемешивание вполне осуществимо в стационарном поле скорости [6]. Гомогенизация смесей при малых числах Рейнольдса достигается за счет сдвиговых напряжений в окрестности препятствий, протяженных вдоль продольной оси и переплетенных между собой [7]. В настоящей работе изучаются высокоскоростные течения, для которых основным механизмом перемешивания выступают вихревые структуры в тангенциально закрученном потоке. Серия вычислительных экспериментов показала перспективность использования вихревых генераторов, построенных на этом принципе.

Рассматривается задача перемешивания в осесимметричном проточном тракте в случае стационарного течения. Расчетная область представляет собой цилиндр длиной $L = 0.165$ м и радиусом $R = 0.006965$ м. Подача жидкости осуществляется через кольцевой разрез, расположенный на расстоянии $2.5R$ от закрытого торца цилиндра. Стационарное векторное поле скоростей схематично изображено на рис. 17.

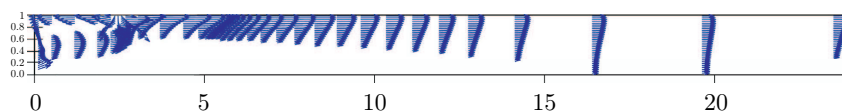


Рис. 17. Стационарное векторное поле скоростей в осесимметричном проточном тракте

Режимы работы вихревых генераторов отличаются тангенциальной скоростью закрутки w и размерами приосевой зоны возвратного течения, а также профилями продольной скорости в выходном сечении. Радиальная скорость подачи жидкости u варьировалась от 0.1 до 8.0 метров в секунду. Скорость закрутки задавалась соотношением $w = 3u$. Наблюдается прямая зависимость между скоростью закрутки и размерами рециркуляционной зоны. Анализ поля скорости показывает наличие неустойчивых стационарных орбит на поверхности зон возвратного течения.

На рис. 18 приведена мгновенная картина перемешивания для четырех разноцветных примесей, вброшенных через кольцевой разрез. Углы вброса локализованы и равны 0° , 90° , 180° и 270° , соответственно. Скорость закрутки потока равна 24.0 м/с.

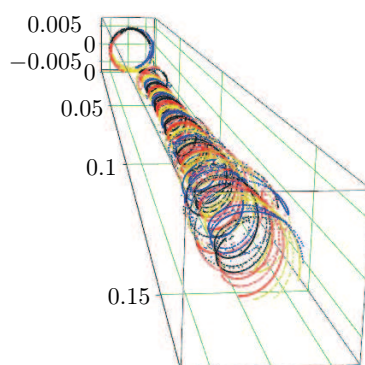


Рис. 18. Мгновенная картина перемешивания примесей

Проведенный анализ критериев качества перемешивания показал, что наилучшее перемешивание происходит в интенсивных вихревых структурах. Этот случай соответствует стационарному течению со скоростью закрутки $w = 24$ м/с. Полученный критерий D_Q равен 0.226, чем выгодно отличается от значений критериев перемешивания в двумерных трактах. В трехмерном случае примесь проходит большие расстояния, что способствует образованию более тонких нитевидных структур. Кроме того, рассматриваемая цилиндрическая смесительная установка превосходит плоские тракты по компактности габаритов.

Заключение

Рассмотрены процессы волнового перемешивания в плоских проточных трактах с различным расположением препятствий. В результате вычислительного эксперимента получено, что необходимым условием наилучшего перемешивания является наличие в потоке крупномасштабных вихревых структур. Показано, что центр вихревой структуры ведет себя подобно эллиптической особой точке. Предложен подход к повышению качества перемешивания с помощью размещения дополнительного ряда препятствий, разбивающих крупные вихревые структуры.

Проведено моделирование процессов гомогенизации в трехмерных смесительных установках со стационарными закрученными течениями. Показано, что эффективность перемешивания повышается с увеличением интенсивности закрутки потока на входе. При этом качество перемешивания в трехмерном случае выше по сравнению с плоскими смесителями.

В качестве нового инструментария для проведения вычислительного эксперимента предложен оригинальный дипольный метод расчета эволюции примеси в жидкости и последующей оценки качества получаемой смеси. Предложенный метод реализован в комплексе алгоритмов и программ для моделирования процессов перемешивания в замкнутых емкостях и проточных трактах.

Разработанные оригинальные программно-алгоритмические решения и новые подходы к созданию смесительных установок могут эффективно использоваться в различных отраслях народного хозяйства, где технологическая цепочка включает измельчение, перемешивание и гомогенизацию суспензий и эмульсий.

Список литературы

- [1] Ареф Х. Вихревая динамика волновых следов // Нелинейная динамика, 2006, Т. 2, №4, с. 411–424.
- [2] Ottino J. M. Mixing, Chaotic Advection and Turbulence // Annu. Rev. Fluid Mech. 1990, №22, p. 207–253
- [3] Ottino J. M. The Mixing of Fluids // Scientific American, January 1989
- [4] Мелешко В. В., Краснопольская Т. С. Смешивание вязких жидкостей // Нелинейная динамика, 2005, Т. 1, №1, с. 69–109
- [5] Vikhansky A. Simulation of topological chaos in laminar flows // CHAOS, V.14, №1, 2004.
- [6] Jones, S. W., Thomas, O. M. and Aref, H.: Chaotic advection by laminar flow in a twisted pipe. J. Fluid Mech. 209, pp. 335–357, 1989.
- [7] Finn, M. D., Cox, S. M. and Byrne, H. M.: Chaotic advection in a braided pipe mixer. Phys. Fluids 15, pp. 77–80, 2003.
- [8] Enright D., Fedkiw R., Ferziger J., Mitchell I. A Hybrid Particle Level Set Method for Improved Interface Capturing // J. Comput. Phys. 183, 83–116 (2002).
- [9] Винников В. В., Ревизников Д. Л. Применение декартовых сеток для решения уравнений Навье–Стокса в областях с криволинейными границами // Математическое Моделирование, 2005, Т. 17, № 8, с. 15–30.