

УДК 532.517

ТРЕХМЕРНАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОЗВЕННОГО АППАРАТА – СМЕСИТЕЛЯ С КАНАЛОМ ДИФфуЗОР-КОНфуЗОРНОГО ТИПА

А.А.Курбангалеев¹, С.Р. Еникеева¹, Н.А. Юдина²

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
arturkurbangaleev@rambler.ru, enikeeva.svetlana@mail.ru, yudinato@gmail.com

Аннотация: ЦЕЛЬ. В работе представлено трёхмерное моделирование турбулентных потоков смешивающихся ньютоновских жидкостей в трубчатых каналах малогабаритного многоканального смесительного аппарата. МЕТОДЫ. Показан алгоритм: построения трёхмерной модели гидродинамического процесса смешения компонент жидкостей в канале трубчатого смесителя диффузор-конфузорного типа в программном комплексе «Fluent». Смешение моделируется при турбулентном режиме. Поддача компонентов в канал происходит через систему струйных форсунок, расположенных в плоскости сечения канала, вдоль продольной оси канала. РЕЗУЛЬТАТ моделирования оценивается по коэффициенту смешения.

Ключевые слова: трёхмерная гидродинамическая модель, турбулентное течение, ньютоновская жидкость, смесительный процесс, диффузор-конфузорный канал.

THREE-DIMENSIONAL HYDRODYNAMIC MODEL OF A MULTI-LINK MACHINE - A MIXER WITH A DIFFUSER-CONFUSOR TYPE CHANNEL

AA. Kurbangaleev¹, SR. Enikeeva¹, NA. Yudina²

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

²Kazan State Energy University, Kazan, Russia
arturkurbangaleev@rambler.ru, enikeeva.svetlana@mail.ru, yudinato@gmail.com

Abstract: THE PURPOSE. The paper presents a turbulent flows three-dimensional modeling of mixing Newtonian fluids in a small-sized multichannel mixing apparatus tubular channels. METHODS. The hydrodynamic process three-dimensional model construction of the liquids mixing the components in the channel of a tubular mixer, a diffuser - converging type in the software package "Fluent" is shown. RESULT. Mixing is simulated under turbulent conditions. The components are fed into the channel through a system of jet nozzles located in the channel section plane along the channel longitudinal axis. The simulation result is estimated by the mixing ratio.

Keywords: three-dimensional hydrodynamic model, turbulent flow, Newtonian fluid, mixing process, diffuser-confuser channel.

В настоящее время в производстве пищевой, нефтяной и химической промышленности происходит постоянное обновление оборудования, появляются все более сложные и высокотехнологичные аппараты. Гидродинамические процессы, происходящие в каналах таких аппаратов, также всё больше усложняются для понимания. Инженеру проектировщику сейчас необходимо в реальном времени визуально представлять и понимать все процессы, которые происходят в канале аппарата во время осуществления процесса смешения или химического превращения. Но и процесс моделирования задач гидродинамики также совершенствуется, появляются множество программных пакетов, описывающих и моделирующих сложные физические процессы. Поэтому сейчас инженеру важно уметь пользоваться такими пакетами. Одним из таких пакетов, отвечающим современным требованиям по описанию гидродинамики различных процессов является программный комплекс «Fluent».

В работе смоделирован гидродинамический процесс смешения в аппаратах-смесителях, называемыми малогабаритными трубчатыми турбулентными аппаратами,

которые бывают много или коротко-зонными рис.1. Родоначальниками в их проектировании стали академик Берлин А.А. и профессор Минский К.С.

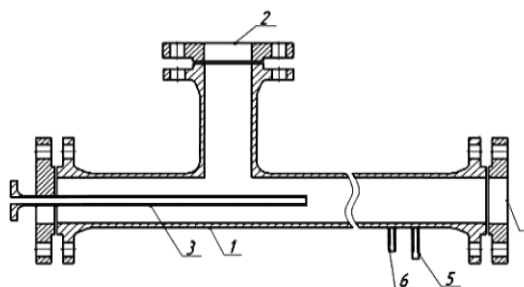


Рис.1. Малогабаритный турбулентный трубчатый канал:
(1)-трубка канала, (2)-ввод мономера, (3)-ввод катализатора, (4)-вывод продукта,
(5)-пробоотборник, (6)-вход для термомпары.

Эти аппараты должны: во-первых обеспечивать наилучшее перемешивание компонентов жидкостей в течение заданного времени, мерой для этого будет являться степень перемешивания, и во вторых канал аппарата должен обеспечить высокую скорость смешения, где мерой будет являться интенсивность перемешивания.

Каналы в малогабаритных трубчатых турбулентных аппаратах могут иметь разные схемы и типы. [1,2], рис 2. Но наибольшую практическую эффективность по смешению турбулентных потоков жидкостей представляют каналы диффузор-конфузорного типа [3-4].

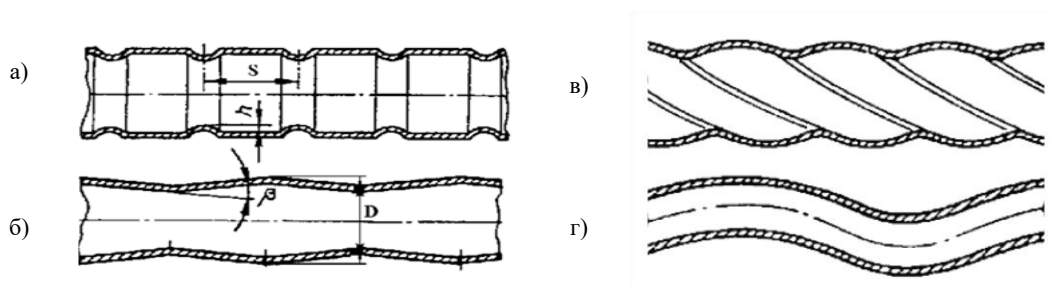


Рис.2. Разные типы трубчатых каналов: а) канал с кольцевым выступом, б) труба или канал типа диффузор-конфузор, в) спирально профилированный канал, г) канал с волновой осью.

Гидродинамические процессы смешения ньютоновских жидкостей, происходящие внутри многозвенного диффузор-конфузорного типа канале при его работе в аппарате - смесителе была хорошо изучена учеными такими как Мухаметзянова А.Г., Данилов Ю.М., Гаранин С.Ф., Тахавутдинов Г.С., Петровым А.Г. и др. [5-8]. Постановка задачи в их работах была как осесимметричная, но при такой постановке задачи невозможно смоделировать ввод компонентов в канал через струйные форсунки, если в реальном аппарате-смесителе подача компонентов смешения в канал осуществляется через систему струйных форсунок или форсуночных головок. То есть, модель в осесимметричной постановке будет не в полном объеме отражать реальную картину происходящего. Ввод компонентов смеси в канал при таком моделировании можно производить только через кольцевое сечение. Поэтому задачу процесса смешения компонентов жидкостей в трубчатом многозвенном канале диффузор-конфузорного типа с вводом компонентов через форсунки нужно моделировать только в трёхмерной постановке [9], что будет наиболее адекватно отражать реальный процесс смешения.

Многозонные аппараты – смесители имеют, как правило, протяжённость зон от 20 до 60 калибров, что составляет 20-60 трубчатых каналов диффузор-конфузорного типа. Эффективность таких аппаратов зависит от согласованной работы двух элементов аппарата: это форсунка или система форсунок и рабочая его зона или калибр, то есть область канала, имеющая один диффузор на входе и конфузор на выходе. Цель данной работы заключена в выяснении условия сочленения и правильного расположения форсунок для входа компонентов жидкостей в канал и рабочей зоны канала, для обеспечения наилучшего перемешивания компонентов задаваемых жидкостей при ограничении, накладываемого на всю протяжённость в зоны аппарата, где должно осуществиться перемешивание, а в некоторых случаях, может быть произведена и химическая реакция. Все ограничения как

раз и зависят от скоростей химических реакций. При высокой скорости химических реакций область или протяженность канала аппарата, где происходит перемешивание компонентов, должна быть малой протяженностью и успеть закончить перемешивание до желаемой степени перемешивания. При малой же скорости химических реакций протяженность зоны перемешивания может быть достаточно длинной.

На первом этапе моделирования в трёхмерной постановке задачи смешения трёх компонентов ньютоновских жидкостей в трубчатом многозвенном канале диффузор-конфузорного типа с вводом второго компонента в канал через струйные форсунки нужно сначала определить, что будет использовано в качестве оценки результата моделирования. Для качественной оценки процесса смешения компонентов использован коэффициент перемешанности [10] формула (1).

$$\gamma_a = 1 - \frac{1}{V} \iiint_V |C(x, y, z) - C_0| dV, \quad (1)$$

где γ_a – средний по объёму коэффициент перемешанности; C_0 – заданная необходимая концентрация; C – получаемая концентрация; V – заданный объем; x, y, z – оси декартовой системы координат.

Коэффициент перемешанности связан со скоростью диссипации кинетической энергии турбулентности, зависящий от длины конфузорной и диффузорной части канала, от протяженности всего трубчатого канала, от соотношения диаметра сечения трубчатого канала и диаметра входных форсунок, от угла раскрытия между диффузорной и конфузорными частями, от соотношения между толщиной трубы канала в самой его широкой и узких частях, а также от свойств и режимов смешивающихся компонентов.

Для поставленной задачи строилась математическая модель на основе системы уравнений Рейнольдса для турбулентного массопереноса [11-12] формула (2).

$$\begin{cases} \bar{\rho} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \overline{\rho u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} \\ \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0, \quad \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_j} = 0 \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x_{jj}^2} \end{cases} \quad (2)$$

где D – коэффициент взаимной диффузии, \bar{p} – осредненное давление. Осреднение \bar{u} – скорости по Фавру [13] формула (3).

$$\bar{u} = \frac{1}{(t_1 - t_2)} \int_{t_1}^{t_2} u dt. \quad (3)$$

При моделировании использовался канал типа конфузор-диффузор угол раскрытия диффузора подобран так, чтобы возникающий нестационарный микро отрыв потока получаемой смеси от стенки, не вызывал резкого повышения гидравлических сопротивлений. Форсунки расположены вдоль продольной оси сечения канала, в плоскости его поперечного сечения. Диаметр форсунок $d_{\text{ф}} = 0,004 - 0,01 \text{ м}$. по отношению к диаметру сечения канала 1:10, $d_{\text{тр.}} = 0,04 \text{ м} - 0,1 \text{ м}$. Скорость потока смеси в пределах от $U = 0,3 \text{ м/с} - 1 \text{ м/с}$.

Предполагается, что смешение происходит без теплового взаимодействия и без протекания химических реакций; компоненты смеси не имеют поверхностей раздела – свободное взаимопроникновение; смесь рассматривается как сплошная среда со средними, зависящими от локальных значений концентрациями $C(x, y, z)$, плотностью и молекулярной вязкостью. Осредненные модели в механике сплошных сред широко представлены в этих работах [14,15,16].

Для замыкания системы уравнений (2) использовалась модель турбулентности: SST – двухслойная модель, предложенная Menter F.R [17].

В качестве граничных условий для трубчатого канала, изображенного на рис. 3, принято, что во входных сечениях канала задаются профили скорости, начальные

параметры турбулентности и объёмные доли, используемых компонентов вида $\varphi(x, z)$:
 $(u_1, \mu_1, C_1, k_1, \varepsilon_1) = \varphi(x, z)_1, (u_2, \mu_2, C_2, k_2, \varepsilon_2) = \varphi(x, z)_2.$

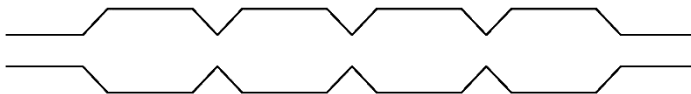


Рис.3. Трубчатый канал диффузор-конфузорного типа

В выходном сечении задаются «мягкие» граничные условия установившегося течения: $\left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right) = 0.$

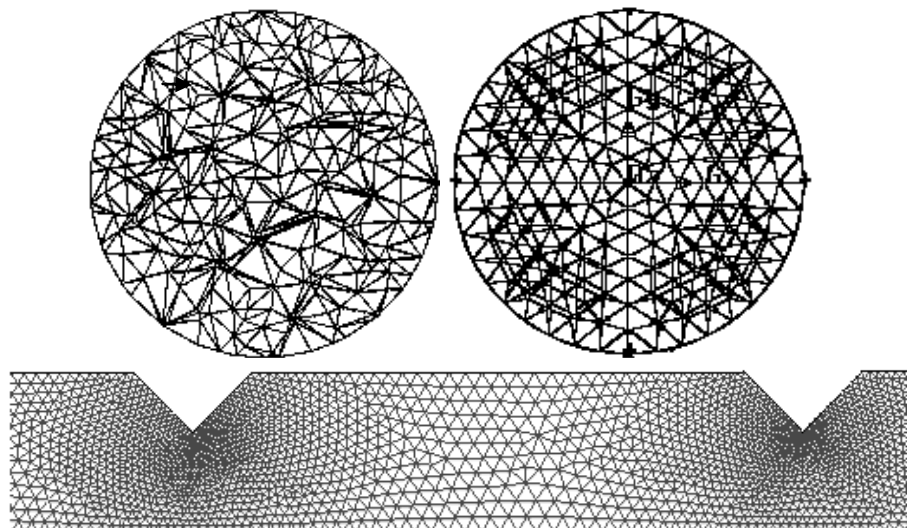
В области стенок использовалась «неравновесная» функция *Non-Equilibrium Wall Functions – NEWF*. На самих стенках условие «прилипания» – все составляющие скорости равны нулю [18-20].

Длину канала рабочей области можно оценить, используя очевидное соотношение (4)

$$L_{pz} = \frac{\lambda}{V}, \quad (4)$$

В этой формуле в числителе задана длина рабочего трубчатого канала или области в аппарате, взятого за пример в сравнении как эталон, а в знаменателе внесена относительная единица (в соотношении с эталоном), названная скоростью произошедшей реакции смешения.

Поставленная задача решалась с помощью пакета «Fluent». Модель гидродинамического процесса смешения трёхмерная, сетка адаптированная. Предварительно проводилась подготовка сеточной области. В области оси симметрии канала сетка разреженная – «грубая», ближе к периферии задавалось сгущение, в области угловых точек для исключения нефизичности применялось разложение в ряды. Также использовалась процедура зеркального отображения сеточной области, для устранения возможной асимметрии течения [21], рис. 4. Наиболее подробное описание адаптации и подготовки сетки к решению задачи приводится в статье [22]. Количество узлов использовалось не менее $N = 100\,000$. Устойчивость метода проверялась по условию Куранта. Сходимость схемы анализировалась на сгущающихся сетках (по коэффициенту перемешанности).



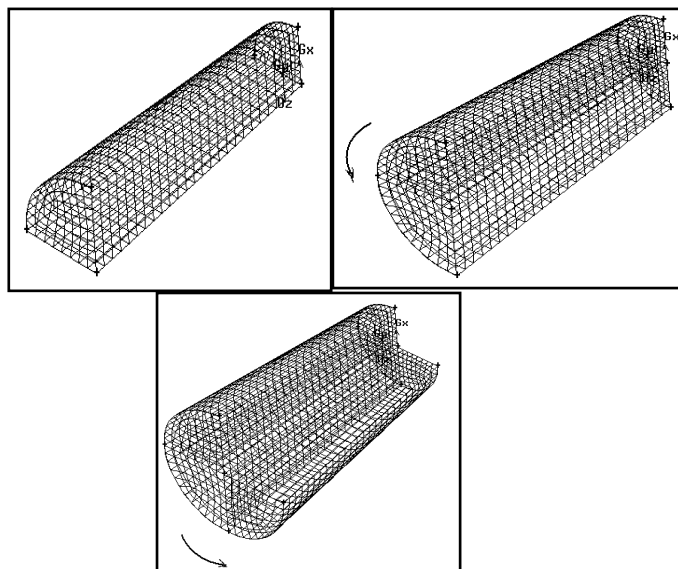


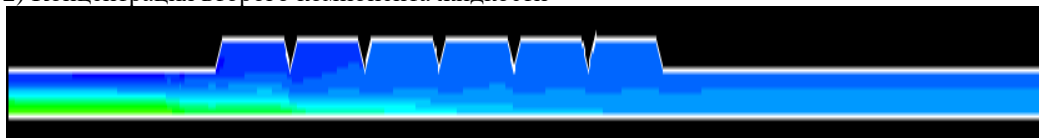
Рис.4. Подготовка и адаптация сеточной области

На рис.5 по результатам моделирования показаны поле концентрации компонента в трубчатом канале диффузор-конфузорного типа, предназначенного для перемешивания трёх компонентов жидкостей, не вступающих между собой в химическую реакцию. Такой пример смешения был проведён в «ООО Булгар синтез». Длина трубчатого канала диффузор-конфузорного типа составляла 50-ый калибр. Получено, что в этом случае на выходе коэффициент перемешанности равен $\gamma_a = 0.949$.

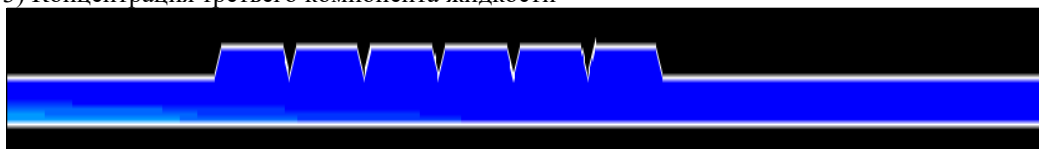
1) Концентрация первого компонента жидкости



2) Концентрация второго компонента жидкости



3) Концентрация третьего компонента жидкости



Total Pressure	
Phase	
mixture	
Min [pascal]	Max [pascal]
106.4894	1008.519

Рис. 5. Распределение концентрации жидкостных компонент. Указано всё давление в канале в 6-ти секциях, связанных с длинным цилиндрическим участком. Коэффициент перемешанности равен $\gamma_a = 0,949$.

При относительной длине канала до 20-ти коэффициент перемешанности на выходе увеличился до $\gamma_a=0,975$, что говорит о повышении качества перемешанности рис.6.

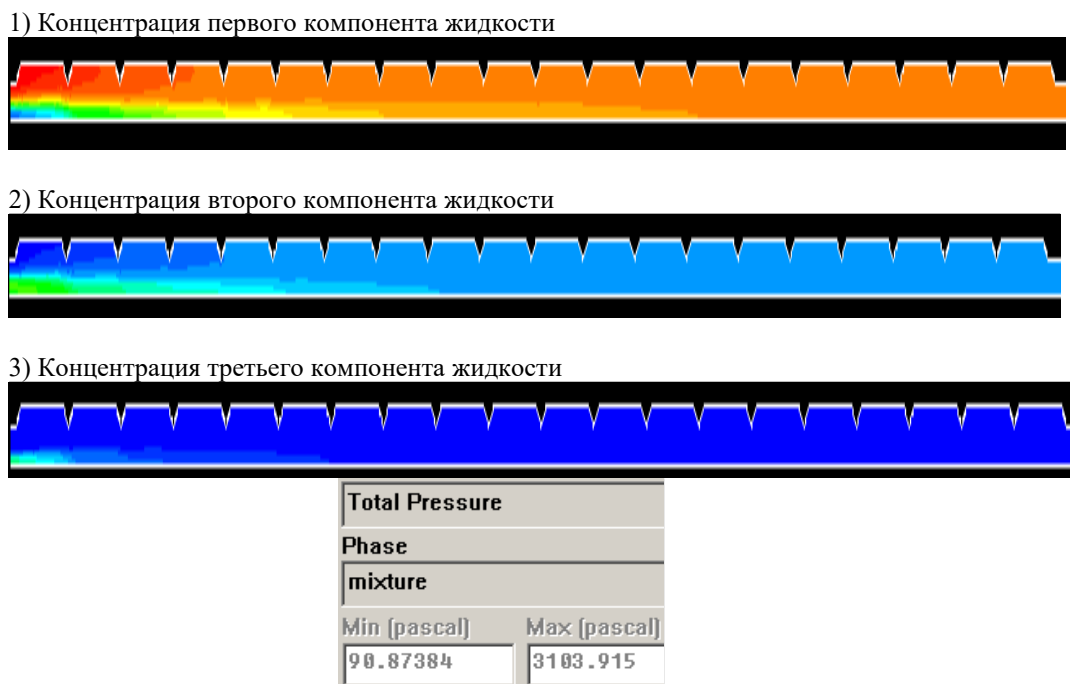


Рис.6. Распределение концентрации жидкостных компонент. Указано всё давление в канале в 20-ти секциях, связанных с коротким цилиндрическим участком. Коэффициент перемешивания равен $\gamma_a = 0.975$.

В результате проведенного моделирования получено, что начиная приблизительно с восемнадцатой секции профили концентраций в цилиндрических аппаратах становятся практически одинаковыми независимо от способа организации подвода компонентов. Аналогичная картина наблюдается и относительно распределения других гидродинамических параметров.

Как правило, для трубчатых многозвенных каналов характерными являются относительные длины с количеством секций в среднем от 25-60 и в ряде случаев даже более. Следовательно, течение потока в большей области канала практически не будет зависеть от способа организации ввода в него компонентов жидкостей. Но всё же основные, влияющие на эффективность канала выходные переменные (энергия турбулентности и скорость её диссипации) в сильной степени будут определяться параметрами вводимых потоков жидкостей в области форсунок, а смоделировать подачу компонентов смешения через форсунки в канал можно только трёхмерной постановкой задачи [23,24]. То есть, только в этом случае полученные аппроксимирующие выражения для основных гидродинамических параметров в зависимости от конструктивных и управляющих переменных должны использоваться при проектировании трубчатых каналов, в том числе и конфузор-диффузорного типа. Также можно отметить, что прежде чем приступить к процессу моделирования смешения в трубчатом многозвенном канале диффузор-конфузорного типа следует сначала провести анализ: подготовить и адаптировать для области течения сетку, выяснить взаимное влияние характера течения потока смеси в канале от подводящей его части форсунок канала, рассчитать и проанализировать обеспечение необходимого времени пребывания компонентов в смеси для лучшего перемешивания.

Литература

1. Прочухан Ю.А., Минскер К.С. и др. Влияние способов смешения на характер протекания сверхбыстрых полимеризационных процессов // Высокомолекулярные соединения 1988. Т.30. №6. С. 1250.
2. Абси Р. Турбулентная вязкость и профили скорости в развитых турбулентных течениях в каналах // Известия российской академии наук. Механика жидкости и газа. Москва. 2019. № 1. С. 138-150.
3. Мухаметзянова А.Г., Захаров В.П., Тахавутдинов Р.Г. и др. Движение многофазных потоков в трубчатых каналах диффузор-конфузорной конструкции // Вестник Башкирского университета. 2002. №1. С. 28-31.
4. Тахавутдинов Р.Г., Дьяконов Г.Р., Мухаметзянова А.Г. Расчет параметров смешения двухфазного потока в диффузор-конфузорном трубчатом аппарате // Сборник научно-методических

статей « актуальные вопросы преподавания при реформировании образовательного процесса». Казань. 2001. С.135-150.

5. Мухаметзянова А.Г., Тахавутдинов Р.Г., Дьяконов Г.С. Численный расчет параметров смешения двухфазного турбулентного потока в диффузор-конфузорном трубчатом аппарате // Межвуз. темат. сб. научных трудов. Казань. КГТУ. 2001. С.4-13.

6. Данилов Ю.М., Мухаметзянова А.Г. Технология проектирования малогабаритных турбулентных трубчатых аппаратов на основе результатов численного моделирования // Ж: Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2011. №5. С.38-42.

7. Garanin S.F., Kravets E.M., Pronina O.N., et al. Numerical Modeling of Two-Dimensional Flow of a Nonhomogeneous Fluid in a Confined Domain// Fluid Dynamics. 2018. Т. 53. № 1. С. 127-135.

8. Петров А.Г. Точное решение уравнений осесимметричного движения вязкой жидкости между параллельными плоскостями при их сближении и раздвижении // Известия российской академии наук. Механика жидкости и газа. Москва. 2019. № 1. С. 58-67.

9. Курбангалеев А.А. Алгоритм 3D моделирования процесса смешения жидкостей в трубчатых каналах // Труды Академэнерго.- изд. Казанского научного центра российской академии наук. 2017. 2.С. 34–47.

10. Курбангалеев А.А. Метод 3D моделирования процесса смешения ньютоновских жидкостей в трубчатых каналах диффузор-конфузорного типа // Международный научно - исследовательский журнал - изд. Екатеринбург. 2016. №12(54). Часть 5.Декабрь. С. 16–21.

11. Deardorff J W. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers//JournalofFluidMechanics1970.cambridge.org 41,pp. 453-480.

12. Hoyas S., Jiménez J. ReynoldsnumbereffectsontheReynolds-stressbudgetsinturbulentchannels// PhysicsofFluids20, 2008.aip.scitation.org101511.

13. Лунев В.В. О модификации осредненных уравнений Навье-Стокса// Известия российской академии наук. Механика жидкости и газа. Москва. 2019. № 2. С. 134-144.

14. Аль джабри А. Я., Плохотников С.П., Никифорова С.Ви др. Вычисление и анализ двумерных и трехмерных течений для различных вероятностных законов задания послышной неоднородности пласта при неизотермической фильтрации // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 1.С.24 -29.

15. Bogomolov V. A., Plokhotnikov S. P., Bulgakova O. R, et al.Mathematicalsimulationofthree-phasefiltrationinstratifiedbedswithaccountfortheschemeofjets// Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Springer.2011. Vol. 84. No. 5. С. 975-979.

16. Plokhotnikov S.P., BogomolovV.A., Nizaev R.Kh, et al. Mathematical Averaging of Coefficients of System of Elliptic and Parabolic Equations in Continuum Mechanics // Lobachevskii Journal of Mathematics. Springer. 2019. Vol.40.No 5. С. 553-561.

17. НикущенкоД.В.

ИсследованиетеченийвязкойнесжимаемойжидкостианаосноверасчетногокомплексаFLUENT// Учебное пособие СПбГМТУ. Санкт-Петербург. 2005г. 94 с.

18. Aleksin V.A. Application of the method of near-wall boundary conditions to an investigation of turbulent flows with longitudinal pressure gradients// Fluid Dynamics. 2017. Т. 52. № 2. С. 275-287.

19. Хименес J. Когерентные структуры в пристеночной турбулентности. // Журнал механики жидкости,842, P1.

20. Горбушин А.Р., Заметаев В.Б., Липатов И.И. Стационарное вторичное течение в плоской турбулентной свободной струе // Известия российской академии наук. Механика жидкости и газа. Москва. 2019. № 2. С. 99-111.

21. Никитин Н.В., Попеленская Н.В. Характеристики неустойчивости, развивающейся в турбулентном течении в плоском канале // Известия российской академии наук. Механика жидкости и газа. Москва. 2019. № 2. С. 72-93.

22. Курбангалеев А.А., Тазюков Ф.Х., Лутфуллина Г.Н. Процесс подготовки сеточной области при 3D – моделировании малогабаритного трубчатого аппарата (МТА) как смесителя в программной среде Fluent// Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т16. №21.С. 242–244.

23. Livshits S., Yudina N., Dunaeva T., et al. Theemergenceofbifurcationphenomenaduringtheflowofrheologicallycomplexmediainatubularreactor/IOPConferenceSeries: Earth and Environmental Science 2019.

24. Курбангалеев А.А., Тазюков Ф.Х., Лутфуллина Г.Н.Проектирование малогабаритных трубчатых аппаратов - МТА как смесителя жидких компонентов с помощью 3D моделирования // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т16. №21.С. 261–263.

Авторыпубликации

Артур Аскарлович Курбангалеев – канд.техн.наук, ст.преподаватель кафедры «Теоретическая

механика и сопротивление материалов», Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Светлана Рашидовнам Еникеева – канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедры «Высшая математика», Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Наталья Анатольевна Юдина – канд. хим. наук, доцент, кафедры «Экономика и организация производства», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Prochukhan YuA, Minsker K.S, et al. Influence of mixing methods on the nature of ultrafast polymerization processes. *High-molecular compounds* 1988;30(6):1250.
2. Absi R. Turbulent viscosity and velocity profiles in developed turbulent flows in channels. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of liquid and gas*. Moscow. 2019;1:138-150.
3. Mukhametzyanova AG, Zakharov VP, Takhavutdinov RG. Movement of multiphase streams in tubular channels of a diffuser-confuser design. *Bulletin of the Bashkir University*. 2002;1:28-31.
4. Takhavutdinov RG, Dyakonov GR, Mukhametzyanova AG. Calculation of the mixing parameters of a two-phase flow in a diffuser-confuser tubular apparatus. *Collection of scientific and methodological articles topical issues of teaching in reforming the educational process*. Kazan. 2001. pp. 135-150.
5. Mukhametzyanova AG, Takhavutdinov RG, Dyakonov GR, et al. *Numerical calculation of the mixing parameters of a two-phase turbulent flow in a diffuser-confuser tubular apparatus*. Interuniversity. topics. Sat. scientific papers. Kazan. KSTU. 2001. pp. 4-13.
6. Danilov YuM, Mukhametzyanova AG. Design technology of small-sized turbulent tubular devices based on the results of numerical modeling. *Zh: Chemical and Oil and Gas Engineering*. 2011;5:38-42.
7. Garanin SF, Kravets EM, Pronina ON, et al. Numerical Modeling of Two-Dimensional Flow of a Nonhomogeneous Fluid in a Confined Domain. *Fluid Dynamics*. 2018;53(1):127-135.
8. Petrov AG. Exact solution of the equations of axisymmetric motion of a viscous fluid between parallel planes when they approach and move apart. *News of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of liquid and gas*. Moscow. 2019;1:58-67.
9. Kurbangaleev AA. *Algorithm for 3D modeling of the process of mixing liquids in tubular channels*. Proceedings of Academenergo. ed. Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2017;2:34-47.
10. Kurbangaleev AA. Method of 3D modeling of the mixing process of Newtonian liquids in tubular channels of diffuser-confuser type. *International scientific research journal* ed. Yekaterinburg. 2016;12(54): 16-21. Part 5.
11. Deardorff JW. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics* 1970;41:453-480.
12. Hoyas S, Jiménez J. Reynolds number effects on the Reynolds-stress budgets in turbulent channels. *Physics of Fluids*. 2008. V.20.
13. Lunev VV. Modification of the averaged Navier-Stokes equations. *News of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of liquid and gas*. Moscow. 2019;2:134-144.
14. Al Jabri AY, Plohotnikov SP, Nikiforova SV. Calculation and analysis of two-dimensional and three-dimensional flows for various probabilistic laws for setting layer-by-layer heterogeneity of a reservoir with non-isothermal filtration. *Bulletin of KSTU im. A.N. Tupolev*. 2019;1:24 -29.
15. Bogomolov V, Plohotnikov SP, Bulgakova OR. Mathematical simulation of three-phase filtration in stratified beds with account for the scheme of jets. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. Springer. 2011;84(5):975-979.
16. Plohotnikov SP, Bogomolov VA, Nizaev RK. Mathematical Averaging of Coefficients of System of Elliptic and Parabolic Equations in Continuum Mechanics. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. - Springer. 2019;40(5):553-561.
17. Nikushchenko DV. Investigation of viscous incompressible fluid flows based on the FLUENT computational complex. *Textbook of SPbGMTU. St. Petersburg*. 2005. 94 p.
18. Aleksin VA. Application of the method of near-wall boundary conditions to an investigation of turbulent flows with longitudinal pressure gradients. *Fluid Dynamics*. 2017;52(2):275-287.
19. Jimenez J. Coherent structures in wall turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 842, P1. doi: 10.1017.2018.P. 144.
20. Gorbushin AR, Zametaev VB, Lipatov II. Stationary secondary flow in a flat turbulent free jet. *News of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of liquid and gas*. Moscow. 2019;2:99-111.

21. Nikitin N.V, Popelenskaya NV. Characteristics of instability developing in a turbulent flow in a flat channel. News of the Russian Academy of Sciences. *Mechanics of liquid and gas*. Moscow. 2019;2:72-93.

22. Kurbangaleev AA, Tazyukov FKh, Lutfullin GN. The process of preparing the mesh area for 3D modeling of a small-sized tubular apparatus (MTA) as a mixer in the Fluent software environment. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2013;16(21):242-244.

23. Livshits S, Yudina N, Dunaeva T, et al. The emergence of bifurcation phenomena during the flow of rheologically complex media in a tubular reactor/ IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2019.

24. Kurbangaleev AA, Tazyukov F.Kh, Lutfullin G.N, et al. Design of small-sized tubular apparatuses - MTA as a mixer for liquid components using 3D modeling. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2013;16(21):261-263.

Authors of the publication

Artur A. Kurbangaleev – Kazan National Research Technological Institute. E-mail: arturkurbangaleev@rambler.ru.

Svetlana R. Enikeeva – Kazan national research technological University (Kazan, Russia). E-mail: enikeeva.svetlana@mail.ru.

Natalya A. Yudina – Kazan State Power Engineering University. E-mail: yudinato@gmail.com.

Поступила в редакцию

10 августа 2020г.