

УДК 504.61:532.5426:536.252

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКИХ СРЕД В СИСТЕМЕ КАНАЛОВ С УЧАСТКАМИ СОЕДИНЕНИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Харламов Сергей Николаевич¹,
kharsn@mail.ru

Фатьянов Дмитрий Сергеевич¹,
dsf5@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования определяется необходимостью анализа особенностей рабочего процесса в аппаратах с соединениями произвольной геометрии, объединяющих/разделяющих течения вязких сред с целью точного и тщательного прогноза нештатных ситуаций их функционирования из-за выраженных тепловых и динамических нагрузок, обусловленных эффектами отрыва, перемешивания, влияния противодействия, эволюции структуры сложного сдвигового неизотермического внутреннего течения при контакте со стенками; потребностью обоснованного выбора с учетом возможностей современной вычислительной техники наиболее естественного подхода исследования пространственного и неустановившегося характера течений в указанных технических системах.

Цель: определить проблемы современного уровня исследования течений в каналах Т-образной формы, являющихся одним из главных элементов технического оборудования в нефтегазовой отрасли; установить ценность имеющихся результатов экспериментального и теоретического анализа сложных сдвиговых потоков для совершенствования методик, способствующих повышению эксплуатационно-конструкционного уровня функционирования устройств при высоких динамических и тепловых нагрузках; определить данные для верификации моделей, способных с большей достоверностью прогнозировать особенности течений и тепломассопереноса в трубах; выдать рекомендации в практику расчета надежности устройств с Т-образными секциями.

Методы: комплексные теоретические и экспериментальные методы анализа гидродинамики и тепломассообмена при вязкостно-инерционных ламинарных и турбулентных течениях углеводородных капельных и газообразных вязких сред во внутренних системах с Т-соединениями магистрали и патрубков.

Результаты. Выполнен критический обзор современных данных, методов моделирования и моделей исследований процессов гидродинамики и теплообмена при смешении капельных и газообразных потоков в элементах трубопроводных сетей в широком диапазоне изменений режимных и геометрических параметров (Т-соединения, симметричное/несимметричное расширение, $Re=10^2...10^7$, $M<0,3...0,7$). Исследованы особенности, формирующие структуру течений в отдельных элементах оборудования, используемого в нефтегазовой промышленности (обвязки крановых узлов). Установлено, что закругление углов соединения способно уменьшить потери энергии в патрубке-отводе на 10–20 %. Проанализированы детали изменений структуры вихрей методами визуализации/бесконтактной регистрации. Приведена классификация структур, полезная при формулировке краевых задач в математическом моделировании процессов в нефтегазовом оборудовании. Отмечается, что использование пристеночных функций для моделирования течений в Т-переходах способно приводить к ошибочной оценке уровня пульсаций температурного и динамического полей в областях стенки. Подчеркнуто, что разделение течений, рост энергонапряженности в локальных участках соединения чувствительны к характеру конвективно-диффузионного взаимодействия процессов переноса импульса, тепла, механизм отрыва, присоединения, локального ускорения/торможения, турбулизации потока в пристеночных областях. Эти особенности вполне успешно могут быть предсказаны современными моделями, учитывающими специфику течений с неоднородной анизотропной турбулентностью. В заключение даны рекомендации по прогнозу локальных и интегральных свойств течений с перемешиванием, а также отмечены проблемы, имеющие фундаментально-прикладное значение, составляющие предмет перспективных исследований.

Ключевые слова:

Каналы, Т-соединения, течения, турбулентность, неизотермичность, модели, методы, моделирование, структура, закономерности.

Введение

Уровень развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) промышленно развитой страны напрямую зависит от степени оптимизации многочисленных технологических процессов, формирующих и поддерживающих работу оборудования трубопроводных систем и резервуарных парков. Выработка решений по эффективному управлению этими системами требует постоянного контроля и прогноза возможных экстремальных режимов, связанных с внештатными ситуациями: перекрытием, остановом/запуском движения рабочей среды по трубопроводу; изменением термодинамических параметров

потока при загруженности системы, соответствующей сезонности потребления; учетом климатических особенностей окружающей внешней среды. Наиболее распространенным конструктивным элементом технических устройств данного назначения являются короткие и/или протяженные участки труб с произвольной геометрической формой поперечного сечения, включающие сочленения с областями расширения, сужения, поворота. К этим объектам предъявляют особые требования, способствующие увеличению их надежности и долговечности при работе во внештатных и аварийных ситуациях. Так, например, на объектах газотранспортной сети, эксплуатируемой ПАО

«Газпром», было замечено, что при заполнении участков газопровода иногда наблюдается разогрев элементов обвязки крановых узлов до недопустимых температур, что, в свою очередь, приводит к оплавлению внешней изоляции трубопровода, нарушению герметичности запорно-регулирующей арматуры. Результатом может стать необходимость проведения ремонтных работ с заменой элементов кранового узла и стравливанием в атмосферу природного газа из участка трубопровода, расположенного между двумя линейными крановыми узлами со средней протяженностью такого участка порядка 30 км, что может привести к экономическим потерям, исчисляемым десятками миллионов рублей [1]. Конструктивно устройства, обеспечивающие работу процессов транспорта природного сырья, представляют собой сложную систему каналов и сочленений с участками различного диаметра, поворотными и тупиковыми зонами с размещенным в них измерительным и управляющим оборудованием. Изучение процессов, происходящих при течении среды в рабочих органах такой системы, позволит: уяснить особенности подобных явлений; установить закономерности интегрального влияния конфигурации элементов, режимов транспорта, их комбинаций на эволюцию гидро- и термодинамических процессов; определить механизмы переноса импульса, тепла и массы, обостряющие аварийные ситуации. Учитывая нетривиальный характер движения рабочего потока (природного сырья), развития возмущений, а также многомерность и многопараметричность процессов гидродинамики и тепломассопереноса в узле конструкции, как части рассматриваемой открытой термодинамической системы типа «внешняя среда – поверхность элемента оборудования – рабочее тело», вполне естественным является изучение переноса импульса, тепла и массы в углеводородных средах методами математического и численного моделирования с прикладной и фундаментальной точек зрения.

Численное решение таких нелинейных задач весьма *актуально* для широкого круга технических приложений в нефтегазовой гидродинамике, все еще испытывающих большой дефицит данных изменений локальных свойств рабочего потока, которые можно было бы привлечь для обоснования вопросов валидации используемой математической модели и верификации результатов расчета энергонапряженных элементов.

В связи с этим в данной работе поставлена *цель: определить* проблемы современного уровня исследования течений в каналах Т-образной формы, формирующих картину смешения потоков в элементах обвязки кранового узла; *установить* ценность имеющихся результатов экспериментального и теоретического анализа сложных сдвиговых потоков для совершенствования методик, способствующих повышению функционирования нефтегазового оборудования при высоких динамических и тепловых нагрузках; *определить* данные для верификации моделей, способных с большей достоверностью прогнозировать особенности течений и тепломассопереноса в трубах;

выдать рекомендации в практику расчета течений в трубопроводах с Т-образными секциями.

Экспериментальные исследования течений в каналах Т-образной формы

Плохопрогнозируемые процессы турбулентного конвективно-диффузионного перемешивания и разделения потоков в Т-образных соединениях являются известными проблемами исследований течений в трубопроводных системах (начиная от вентиляционных шахт, трубопроводов тепловых электростанций, систем транспорта углеводородного сырья и заканчивая трубопроводами атомных станций), осложненных пульсациями температуры, давления, состава смесей, ростом усталостных напряжений, а также термической деградацией и разрушением материала внутренней стенки [2]. Чтобы корректно оценить вероятность возникновения недопустимых дефектов на всех Т-образных соединениях в трубопроводной системе и, соответственно, оптимизировать циклы технического обслуживания, необходимо: *изучить* особенности изменений локальной структуры потока (температуру, скорость и давление на стенку в области перемешивания/разделения); *исследовать* механизмы и эффекты, ответственные за колебания температуры, давления, изменения локальных свойств вихревого течения.

Первоначально такие задачи интересовали экспериментаторов в случаях смешения/разделения потоков из основной магистрали и подводящего патрубка с Т-образным соединением [3] и включали визуализацию структуры течения, измерения полей скоростей, температуры с использованием методов контактной и бесконтактной регистрации в рамках термоанемометрического анализа, оптических волокон, а также лазерной доплеровской велосиметрии (LDV/PIV Systems). Эти результаты позволили обнаружить специфические явления в волновых течениях, существование в потоках обширных рециркуляционных областей, характеризующихся взаимосвязанными эффектами отрыва/присоединения, интенсификации прямоочных и закрученных возвратных движений, изменений масштабов и форм вихревых структур, режимов течений, затрудняющих их комплексное моделирование.

В [4] выполнено экспериментальное и численное исследование в рамках современных подходов (прямого численного моделирования) течений в Т-образном соединении при $Re=2000...36000$ с целью выяснения влияния тепловых и динамических условий входящих потоков на интенсивность смешения, и обнаружено, что сильная термическая стратификация существенно подавляет турбулентные пульсации. Результаты детального моделирования показывают, что особенности температурных колебаний обусловлены существованием в потоке крупномасштабных структур, образующихся в процессе смешения в области узла соединения (рис. 1). Заметим, что неизотермическое течение в прямоугольном канале с Т-соединением также рассматривалось в экспериментах Дж. де Тилли и Дж.М. Соузы [5]. Результаты позволили сформулировать зависимость эффективности

охлаждения потока от числа Рейнольдса (в режимах с $Re=6500...19500$) с учетом изменений скорости зарождения крупномасштабных вихревых структур на границе раздела основного и подводящегося потоков (рис. 2). Х. Камиде и соавторы [6] предприняли детальное изучение течения в Т-соединениях с круглым поперечным сечением и сформулировали зависимость для прогноза процесса смешения посредством связи от отношения импульсов основного потока и подводящейся к нему струи. М. Хирота с соавторами

[7] также провели экспериментальный анализ динамики потоков в каналах прямоугольного сечения с Т-переходниками и оценили особенности влияния колебаний сдвигового слоя, формирующегося в области между поперечным потоком и набегающей струей, на эффективность перемешивания. Подобные задачи при экспериментальном исследовании конвективно-диффузионного смешения потоков в условиях термической стратификации в Т-образных соединениях также представлены в [8–10].

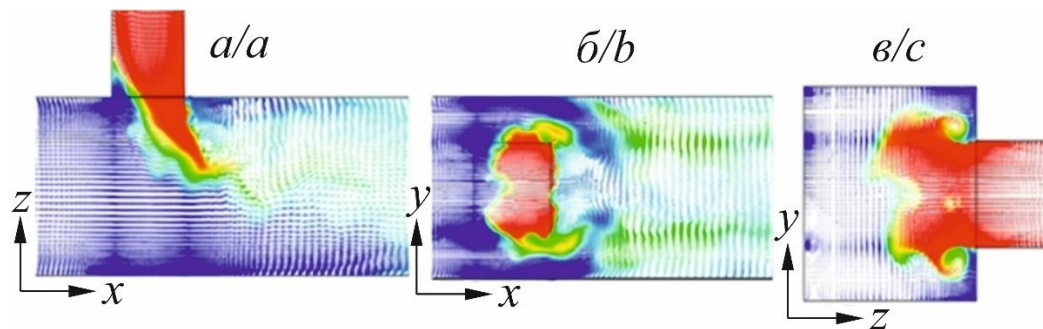


Рис. 1. Структура течения в канале сложной геометрии в рамках прямого численного моделирования. Векторные поля актуальных значений скорости и температуры в выделенных плоскостях: а) Ozx ; б) Oxy ; в) Oyz . Результаты отвечают данным [4]

Fig. 1. Flow structure in the complex geometry channel at direct numerical simulation. Vector fields of velocity and temperature instantaneous values at the cross-sections: а) Ozx ; б) Oxy ; в) Oyz . Results are consistent with the data [4]

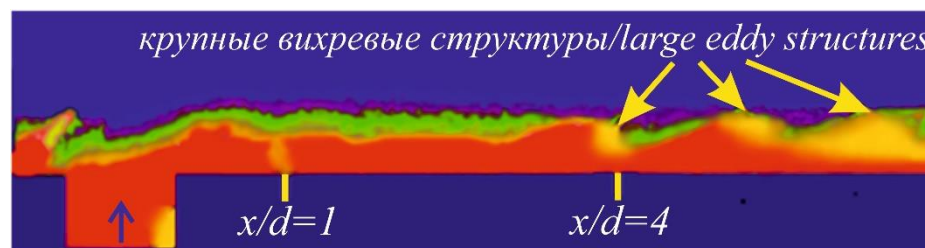


Рис. 2. Визуализация течения при $Re=13000$ в канале с Т-соединением. Результаты отвечают данным [5]

Fig. 2. Flow visualization at $Re=13000$ in channel with T-junction. Results are consistent with the data [5]

К. Уолкер и М. Шимано провели измерения характеристик смешивающихся потоков жидкости в Т-образном соединении (в диапазоне $Re=8700...52600$), используя датчики с проволоочной сеткой [11]. Благодаря высокому пространственному и временному разрешению датчиков результатами данного исследования сформирована база новых данных, позволяющая проводить качественную верификацию и валидацию инженерных моделей, активно используемых в расчетах гидродинамики с привлечением популярных кодов. Стоит отметить, что в [11] изучены стохастические колебания и механизмы смешения динамического и температурного полей в широком диапазоне частот. Информация о локальных свойствах вихревого течения и его масштабах, эффективности диффузионного смешения была получена с учетом одно- и двухточечных корреляций пульсационных величин рабочей среды.

С.М. Хоссейни и соавторы в [12] рассматривали конфигурацию канала с Т-образным соединением с 90° отводом, расположенным выше по течению от тройника. Заметим, что подобная модель была использована

как конструктивный прототип части трубопроводов на реакторе «Феникс» с целью проанализировать явление теплового смешения. Полученные данные о температуре и скорости течения продемонстрировали сильное влияние 90° изгиба, а также соотношения импульсов между основной скоростью и скоростью потока, подводящегося через Т-соединение на механизмы перемешивания жидкости в диапазоне изменений чисел Рейнольдса $Re=33000...150000$. Основываясь на эксперименте, Хоссейни провел классификацию структур смешения по поведению подводящейся струи, разделяя их на четыре типа: *пристенная* струя (рис. 3, а), характерная для ситуаций, когда скорость основного потока значительно выше скорости потока подводящегося; *повторно присоединенная* струя (рис. 3, б) с характерными зонами отрыва и присоединения потока; *поворотная* струя (рис. 3, в), образующаяся, когда импульсы основного и подводящегося потока близки по своим значениям; *падающая* струя (рис. 3, г), возникающая в случае, если скорость подводящегося потока намного превышает скорость основного, в результате чего подводящийся поток

может достичь противоположной стенки основного канала. Подобная классификация предлагалась также по результатам исследований [6] (рис. 4), что демонстрирует стабильность генерируемых процессов и механизмов переноса импульса в данных условиях.

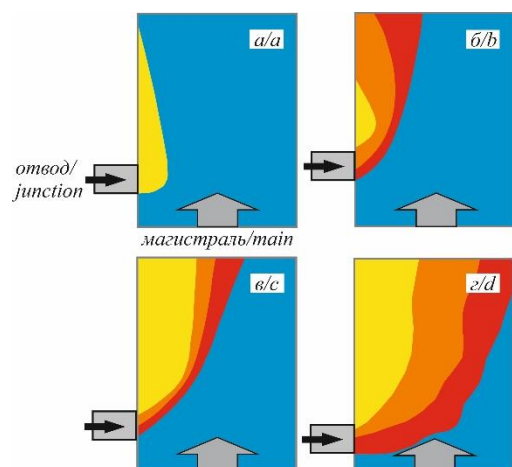


Рис. 3. Картины течения при введении подводящейся струи: а) пристенная; б) повторно присоединенная; в) поворотная; г) падающая. Результаты соответствуют данным [12]. Для наглядности динамики взаимодействующих струй цветом выделены контуры областей с характерной локальной интенсивностью процесса смешения и их границы взаимодействия

Fig. 3. Flow patterns when the jet is introduced: a) wall; b) re-attached; c) turn; d) impinging. Results are consistent with the data [12]. To illustrate the dynamics of the interacting jets, the color outlines of the areas with the characteristic local intensity of the mixing process and their interaction boundaries are highlighted

Следует отметить, что довольно тщательный эксперимент по изучению смешивающихся в Т-образном соединении жидкостных потоков, в котором анализировались распределения полей осредненных и пуль-

сационных составляющих векторов скоростей и температуры, был выполнен шведской компанией Vattenfall (рис. 5) [13]. Данные, полученные в ходе этого эксперимента, часто использовались в качестве контрольных для валидации инженерных моделей турбулентности. Чувствительность процессов к особенностям течений определялась условиями, в которых между ответвлением/соединением и основными трубами тройника/магистраль поддерживался постоянный температурный напор ($\Delta T \approx 15$ К).

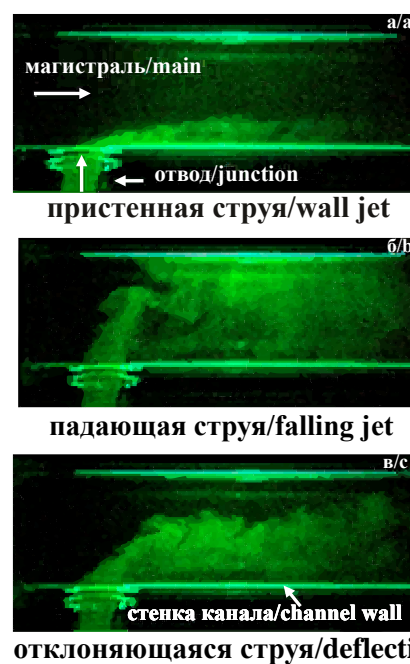


Рис. 4. Структура течения в Т-образном канале: а) пристенная струя; б) падающая струя; в) отклоняющаяся струя. Результаты соответствуют [6]

Fig. 4. Flow structure in the T-formed channel: a) wall jet; b) falling jet; c) deflecting jet. Results are consistent with the data [6]

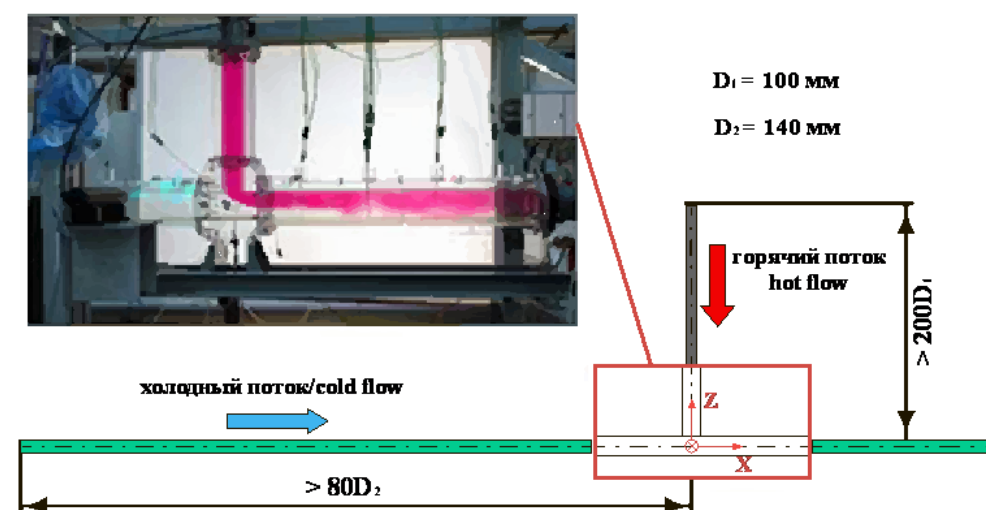


Рис. 5. Эксперимент компании Vattenfall по данным [13]

Fig. 5. Vattenfall experiment according to the data [13]

Разъединяющиеся потоки в Т-образном соединении исследовались при ламинарном и турбулентном режимах течений. Так, например, экспериментальный анализ ламинарного потока, разделяющегося в Т-соединении, выполнен Д. Липшем [14] с использованием лазерного доплеровского анемометра (LDV System), фокусировался на уяснении характера влияния числа Рейнольдса и массового расхода на поле скоростей, а также на интегральные параметры течения (локальное напряжение сдвига и гидравлическое сопротивление). Данные опыта подтверждают наличие отрывных зон как в основной магистрали соединения, так и в отводном патрубке (например, рис. 6). Также в [14] проведено численное моделирование течения в соединении. Его результаты показали вполне удовлетворительное соответствие данным опыта в подобных условиях.

Механизмы процессов переноса, определяющие разделяющиеся турбулентные потоки в Т-образном соединении, рассматривались в [15, 16]. Так, Сьерра Эспиноза в [15] выполнил комплексное экспериментально-теоретическое и численное исследование турбулентной структуры воды на выходе из ответвления тройника. Н. Коста в [16] исследовал влияние формы сочленения каналов (острых и закругленных углов в Т-образном соединении) на изменение поля давления и потерь энергии при течении ньютоновской вязкой жидкости. Было обнаружено, что геометрия секций с закруглением углов уменьшает потери энергии в патрубке/отводе на 10–20 %, а также увеличивает в нем степень турбулизации рабочего течения. Важно отметить, что в данных условиях влияние формы соединения на эволюцию потока в магистральном канале пренебрежимо мало.

Таким образом, полный и общий анализ экспериментальных данных, иллюстрирующих поведение параметров и структуры вязкого течения в Т-соединениях, характерных для объектов газотранспортной сети, показывает, что для прогноза с достаточной степенью надежности гидродинамики в неизоэтермических турбулентных течениях углеводородных сред инженерам-исследователям будет требоваться адаптированная для данных условий модель гидродинамической турбулентности. Желание предсказать в узле соединения истинный характер развития течения с перемешиванием, природу возникновения, изменений крупномасштабных турбулентных структур потребует оценок реальных возможностей используемых моделей турбулентности проникать в узкие пространственные области высоких градиентов. В связи с этим целесообразно остановиться на деталях теоретического описания многомерных сдвиговых течений с большими градиентами искомых функций, выраженной деформацией, нелинейностью изменений физических свойств, методах и подходах, часто используемых в инженерных приложениях.

Численное моделирование течений в каналах Т-образной формы

Известно [17–21], что с точки зрения численного анализа прогноз гидродинамики и теплообмена при тур-

булентном неизоэтермическом течении в Т-образном соединении осложнен необходимостью корректного описания динамики специфических вихревых структур в условиях существования областей отрыва, присоединения, рециркуляции. Это предъявляет повышенные требования к выбору подходов и моделей определения коэффициентов молярного переноса импульса и теплоты. Поскольку различные методы вычислительной гидродинамики способны давать результаты конкретного метода в зависимости от указанных факторов (самих моделей течения, схем дискретизации, разрешения вычислительной сетки и т. д.) [18], целесообразно выполнение серий исследований, в которых расчетные данные требуется тестировать со своими экспериментальными аналогами с целью выяснения степени достоверности теоретических результатов.

Публикации последних лет указывают, что наиболее интересные оценки способности кодов вычислительной гидродинамики предсказывать турбулентное перемешивание в Т-образных соединениях представлены в замечаниях [19]. Так, в данном исследовании результаты численного моделирования указанных течений рядом специалистов сравнивались с данными измерений [13] полей скорости и температуры ниже по течению от Т-образного соединения. Расчеты представлены с использованием популярных кодов FLUENT, ANSYS-CFX, STAR-CCM+, OpenFOAM, а также оригинальных авторских программ на разностных сетках с высокой степенью разрешения (порядок числа ячеек $\sim 2,80 \cdot 10^5 \dots 7,05 \cdot 10^7$). Заметим, что при моделировании процессов турбулентного переноса использовались: моментный метод, метод крупных вихрей и прямое численное моделирование. Такие исследования показали, что предпочтительнее выглядят в сравнении с данными экспериментов результаты расчетов по методу крупных вихрей. Причем в расчетах поля скорости вполне надежен моментный подход, в котором $k\omega$ -модель [17–21] и ее последние модификации к переходным явлениям (Shear Stress Transport (SST)) весьма популярны в классе двухпараметрических замыканий, а также направление с использованием современных идей гибридного моделирования, позволяющего обойти сложности прогноза низкорейнольдсовой турбулентности методом крупных вихрей за счет комбинаций с RANS моделями, где особенно перспективна методология отсоединенных вихрей (detached-eddy simulation (DES)) в комбинации с SST $k\omega$ -моделью. Возможности других версий моделей высшего порядка RANS метода в расчетах потоков в каналах сложной геометрии отмечались также в [20].

Из приведенных выше результатов ясно, что создание методик расчета двух- и трехмерных эллиптических сдвиговых течений по моделям с широким диапазоном ее реализации является весьма затруднительным с точки зрения возможностей ПЭВМ и стоимости расчетов. Поэтому на практике стремятся использовать численные схемы с замыканиями определяющих уравнений движения по моделям RANS метода с эффективными двухпараметрическими опор-

ными базами. Такой подход, хотя и непригоден при расчетах потоков с выраженной неоднородной анизотропной структурой, характерной для рассматриваемых геометрических конфигураций, с принимаемой погрешностью может служить источником контроля процессов в исследуемом течении с Т-соединениями.

Преимущества прогноза структуры течений в элементах оборудования современными теориями

Заметим, что обращение к методам прямого численного моделирования для уяснения сути эффектов смешения в Т-образном соединении в зависимости от изменений термодинамических параметров (актуальных значений скорости, температуры, давления), описывающих состояние входящих в трубопровод потоков в рамках отдельных упрощений, было предпринято Н. Фукушимой с соавторами в 2003 г. [4]. Это представляется вполне обоснованным, учитывая известные преимущества данного подхода перед другими методами моделирования сложных сдвиговых потоков [21]. Детальному изучению эволюции пространственной турбулентной структуры неизотермического потока и теплообмена в Т-соединениях в условиях смешения горизонтального магистрального капельного течения с более холодным и набегающим сверху вертикальным потоком жидкости посвящено исследование М. Георгиоу и М. Папалександриса [22]. Такое моделирование гидродинамики и теплообмена в условиях жидкостно-жидкостного смешения показывает, что адвективно-диффузионные механизмы теплового процесса и изменения турбулентности локализованы в области взаимодействия сдвиговых слоев, которые формируются в окрестностях углов входа вертикальной струи. Эти слои достаточно быстро группируются в многочисленные дорожки структур с разномасштабными вихрями. Большинство из них

распадаются на небольшие вихри и переносятся основным потоком в нижнюю по направлению движения зону трубопровода. По мере того как слои сдвига распространяются вдоль по течению, они успевают взаимодействовать с окружающим потоком и в конечном итоге сливаются, что интенсифицирует механизмы смешения, молекулярной и молярной диффузии тепла и импульса (рис. 6). Анализ бюджета турбулентной кинетической энергии (например, [17]) также подтверждает доминирующую роль этих сдвиговых слоев в генерации и переносе турбулентности. Другой важной особенностью потока является то, что рециркуляционный вихрь приводит к появлению эффекта Вентури, который создает благоприятный градиент давления и условия для ускорения как основного потока, так и входящей через соединение струи.

Весьма ценно для практики, что в [22] результаты расчета по прямому моделированию отмечены сравнениями с ранее полученными авторами результатами моделирования крупных вихрей без привлечения техники пристеночных функций [23]. Анализ показывает, что такой подход обеспечивает удовлетворительные прогнозы для пространственного изменения статистических моментов первого и второго порядка пульсационных величин потока. Следует отметить, что в этом случае наиболее заметно несоответствие деталей прогноза эволюции вихревых структур. Так, метод больших вихрей дает не вполне точные распределения для моментов второго порядка пульсаций поля скорости в области интенсивного генерирования турбулентности, в частности, в зоне рециркуляции. Однако выявленные отличия не следует считать принципиальными для отказа от метода, учитывая значительную экономию вычислительных ресурсов.

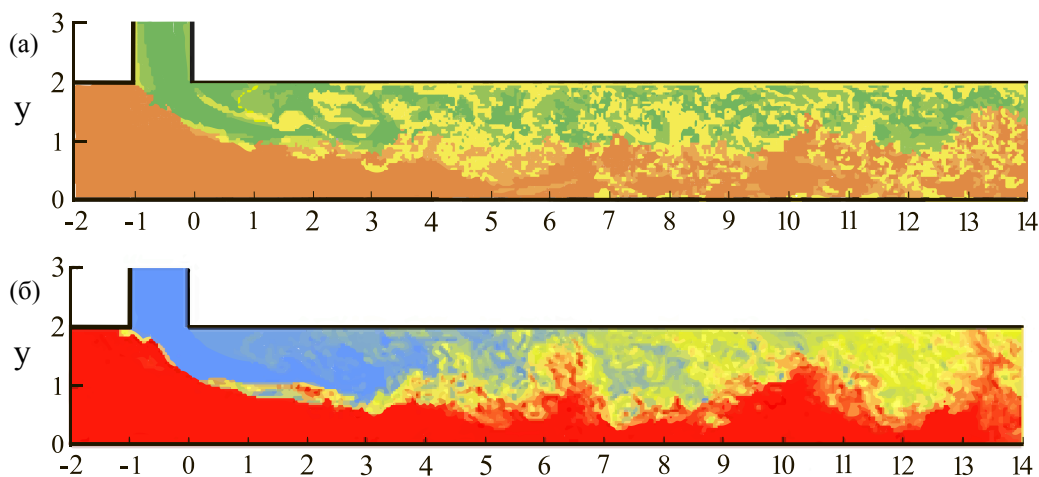


Рис. 6. Эволюция турбулентной неизотермической структуры течения в трубопроводе: а) вихревая картина; б) тепловая картина. Результаты отвечают данным [22]

Fig. 6. Evolution of the turbulent non-isothermal structure of flow in the pipeline: а) vortex picture; б) thermal picture. The results are consistent with the data [22]

Таким образом, выполненный анализ проблем прогноза течений в Т-соединениях в рамках современных подходов показывает, что большинство исследований рассматриваемых процессов (гомогенных,

гетерогенных смесей) в рамках прямого моделирования требует серьезных вычислительных затрат, что обоснованно заставляет искать пути их решения по моделям (RANS метода), в том числе в нестационар-

ной формулировке (URANS), по методу больших вихрей, а также методу моделирования отсоединенных вихрей (детали, например, в [24–29]).

Также представленные выше сведения по визуализации и численному эксперименту указывают на необходимость корректного учета моделями эволюции упорядоченных крупномасштабных структур внутри плоских турбулентных слоев при перемешивании. Видно, что в Т-соединениях подобные образования выражены особенно в условиях движения потоков с низкими числами Рейнольдса, Маха, Ричардсона и т. д. Тогда их исследование может представлять самостоятельный интерес при выяснении вопроса о механизмах транспорта данных структур как части остаточных эффектов переходного процесса при смешениях потоков вязких сред.

Некоторый анализ имеющихся данных об особенностях процессов и структуры течений в отдельных элементах специального оборудования для ТЭК, нефтегазовой и химико-технологической отраслей промышленности (в частности, с Т-, U- соединениями, обвязки крановых узлов и т. п.) показывает [1, 30–38], что течение «выстраивается» вокруг некоторой системы вихрей со специфической формой, зависящей от времени и динамики течения на границах слоя перемешивания. На основе этих представлений следует сделать вывод, что упорядоченное движение в организованных пространственных вихрях может выступать определяющими процессами, генерирующими перемешивание турбулентных слоев. Поэтому их структура и характер взаимодействия должны рассматриваться в качестве существенных аспектов для перспективных экспериментальных и численных исследований смешения и гидродинамики в узлах соединений НГО.

Возможности передовых инженерных технологий

Одним из первых успешных прогнозов течений в Т-образном канале на основе больших вихрей было исследование Л. Ху и М.С. Казими [2]. После чего подобные работы были проведены Дж. Ли [39], С. Кун [40], Т. Лу [41]. Однако во всех этих исследованиях использовались довольно грубые сетки.

Дальнейшие усложнения задачи, связанные с потребностью учета изменений различных типов характерных движений, интенсивных, полностью трехмерных при смешении вязких потоков в каналах с соединениями и их расчетов на более мощных ПЭВМ, выявили проблемы описания особых зон низкорейнольдсового течения и заставили искать компромисса между затратами на численную реализацию модели и тенденцией к увеличению плотности узлов сетки в расчетной области. Например, А. Заковиц и М. Михеску [42] выполнили моделирование крупномасштабных структур в Т-соединениях с круглым и прямоугольным сечениями с использованием сеток высокого разрешения при числах Рейнольдса порядка 10000. Установлено, что в подобных конфигурациях сдвиговой слой, формируемый между магистральным потоком и подводящей струей, становится чувствительным к возникновению колебательных эффектов

уже при числах Струхала $Sh \sim O(10^\circ)$, характерных для нестационарных течений. Отметим, что в [43, 44] также обращено внимание на подобные эффекты при попытке исследований в рамках метода крупных вихрей на сетках высокого разрешения процессов смешения, соответствующих экспериментальному анализу течений [9].

Задача уяснения гидродинамических особенностей смешения также определила круг проблем моделирования неизотермических течений, оценки степени влияния переменности теплофизических свойств смеси. Заметим, что предварительно большой цикл исследований касался случаев течений со слабой неизотермичностью (процессов при небольших значениях температурных напоров). И отдельные данные численных исследований турбулентного теплообмена в каналах (например, [45, 46]) показали, что тепловые процессы и изменения полей температуры, скорости способны играть существенную (и нередко определяющую) роль при формировании слоев смешения, мод неустойчивости, генерирования вихревой структуры потока, чувствительной к начальным условиям. Справедливости ради отметим, что информации об эволюции течения, когда температура действует как активный скаляр смешения, всё еще недостаточно. Полемика по этим вопросам продолжается, является конструктивной и дружественной и позволяет констатировать (например, [47–53]) следующее.

Так, П. Силавам с сотрудниками [47] дополнительно исследовали процесс неизотермического смешения потоков с высокими температурными напорами порядка $\Delta T = (117 \dots 125)^\circ\text{K}$, а данные Р. Говарда и Е. Серра [48] позволили констатировать, что моделирование на основе крупных вихрей вполне экономично с привлечением технологий пристеночных функций. В то же время известно [49], что такой подход не вполне корректен при прогнозах сложных сдвиговых течений в Т-образных каналах, что обусловлено значительным отклонением профилей скорости вблизи стенки от его универсального закона. На это указывают свидетельства (например, [50, 51]) того, что пристеночные функции неэффективны в областях отрыва и, как правило, в областях с отрицательными или положительными градиентами давления. Кроме того, С. Джайараду и Е. Комен [52] отмечают, что из-за того факта, что пристеночные функции основаны на стационарных уравнениях пограничного слоя, на их основе численные решения для соединений не дают удовлетворительных результатов при прогнозировании поведения флуктуирующих величин и, следовательно, привлечение аппарата пристеночных функций подчеркивает спорность и некорректность технологии. Р. Танстол в [53] также показал, что использование пристеночных функций для моделирования течений в Т-переходниках приводит к ошибочной оценке уровня пульсаций температурного и динамического полей в областях стенки. Учет этих обстоятельств показывает, что в последнее время все больше проводится исследований низкорейнольдсовых потоков у стенок с помощью метода больших вихрей

без пристеночных функций. Так, в [54] было выполнено исследование течения в канале с Т-переходом и изогнутым отводом, расположенным выше по течению при числах Рейнольдса порядка 100000. Показано, что наличие отвода приводит к образованию вихрей Дина, которые играют важную роль в процессе перемешивания двух потоков. М. Джорджиу и М. Папалександрис [50] представили расчет слабосжимаемого потока и предсказали наличие дополнительных областей со вторичными рециркуляционными эффектами, которые образуются вблизи присоединения подводящегося потока к магистральному движению. Отдельные сведения по анализу этих процессов иллюстрируют результаты данных по сравнению рас-

четов методами прямого моделирования и крупных вихрей (например, рис. 7, 8) радиальных полей осредненной и пульсационной скоростей в некоторых выделенных по длине сечениях трубопровода. Заметим, что в [23] также проанализировано неизотермическое турбулентное течение газожидкостных потоков в Т-соединениях и исследована роль температуры в качестве активного скаляра. Из анализа результатов, представленных на рис. 7, 8, в целом следует, что данные крупномасштабного моделирования без использования пристеночных функций достаточно близки к соответствующим результатам прямого численного подхода.

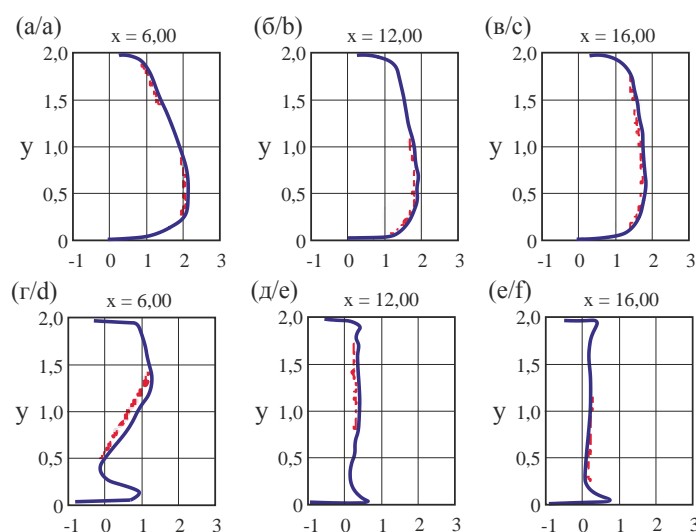


Рис. 7. Радиальные распределения осредненной и пульсационной скоростей в соответствующих выделенных по длине сечениях трубопровода. Сравнение рассчитанных профилей по методу крупных вихрей (пунктирная линия) и прямого численного моделирования (сплошная линия) отвечает случаям: а, б, в) осредненной скорости; г, д, е) пульсационной компоненты скорости. Результаты соответствуют данным [50]

Fig. 7. Radial distributions of averaged and pulsated velocities in the corresponding distanced sections of the pipeline. Comparison of calculated profiles by large eddy simulation (dotted line) and direct numerical simulation (solid line) corresponds to cases: a, b, c) averaged velocity; d, e, f) pulsated velocity. The results are consistent with the data [50]

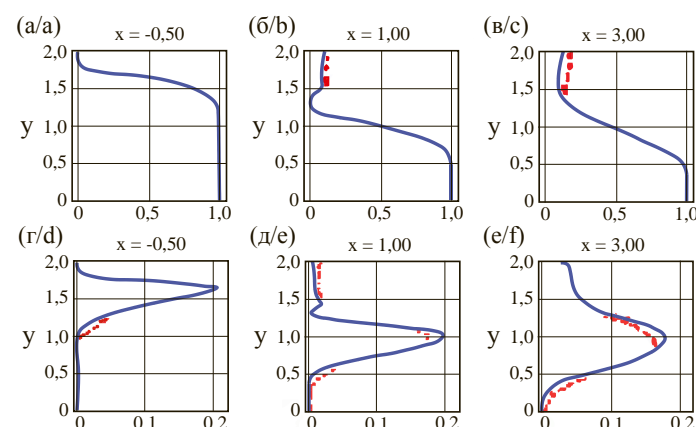


Рис. 8. Радиальные распределения осредненной и пульсационной температуры в выделенных по длине сечения трубопровода, рассчитанные по методу крупных вихрей (пунктирная линия) и прямому численному моделированию (сплошная линия): а, б, в) осредненная температура; г–е) пульсационная температура. Результаты соответствуют данным [50]

Fig. 8. Radial distributions of averaged and pulsated temperature in the distanced by the length of the section of the pipeline, calculated by large eddy simulation (dotted line) and direct numerical simulation (solid line): a, b, c) averaged temperature; d–f) pulsated temperature. The results are consistent with the data [50]

Ресурсоэффективные технологии расчета смешивающихся внутренних течений

В связи с тем, что повсеместное применение LES подхода в инженерных расчетах гидродинамики пространственных течений в каналах со сложной геометрией подводящих патрубков ограничено вычислительными мощностями, дополнительный импульс получили исследования течений в рамках менее энергозатратных технологий. В этом отношении интересны результаты исследований разделяющихся турбулентных потоков в Т-образном соединении, представленные, например, в [15]. Здесь численные эксперименты эволюции процессов переноса при изменении турбулентной структуры потока воды на выходе из ответвления тройника выполнены *in situ* при $Re=126000$ с привлечением инженерных моделей турбулентности RANS метода: *standard $k\epsilon$* [55], *RNG $k\epsilon$* [56] и модели напряжений Рейнольдса (RSM) [20, 57]. Расчеты указывают, что имеется несоответствие между прогнозами и измерениями в области. Кроме того, предсказания не воспроизводили область отрыва обратного потока, которая наблюдалась в эксперименте.

Исследования [58] на основе моделей, использующих нестационарную формулировку определяющих уравнений, осредненных по Рейнольдсу (URANS), таких как *$k\omega$ -SST* [59] и *$k\omega$ -BSL* [60], RSM- *$k\epsilon/k\omega/kL$* [61, 49], ясно показывают их способность к удовлетворительному расчету турбулентного перемешивания изотермического потока вязкой капельной среды в Т-переходах. В то время как точность прогнозирования перемешивания жидкости в неизотермических условиях в Т-переходниках все еще остается недостаточной. Это приводит к заключению, что для расчета таких потоков необходимо привлекать современные вихревые модели, а также некоторые гибридные схемы (LES/DES/SAS) для формулировки эффективной модели адаптивного масштаба (SAS – scale-adaptive simulation) [58].

Включение реологического фактора в детали моделирования процессов перемешивания вязких углеводородных систем потребовало уяснения специфики их внутреннего течения. Так, в [62] представлено численное решение разделяющихся изотермических ламинарных и турбулентных течений ньютоновской и неньютоновской жидкостей в Т-образных каналах с двумя выходами на основе явной алгебраической модели напряжений Рейнольдса (EARSМ [63, 64, 21]). Учитывается, что каналы имеют постоянное квадратное или круглое поперечное сечение. Результаты показали, что EARSМ модель достаточно эффективна [63, 64] в прогнозе изменений структуры потока с неоднородной анизотропной турбулентности и способна реагировать на эффекты, генерирующие вторичные токи в каналах с нетривиальной формой поперечного сечения.

Т. Хехне [65] использовал *$k\omega$ -SST* модель турбулентности [59] и пришел к выводу, что получение реалистичных данных о процессах в неизотермическом перемешивании в Т-соединении весьма грубо в сравнении с моделями полных уравнений для тензора напряжений Рейнольдса – RSM) [57, 51, 49]. Заметим,

что в [66, 67] также утверждается, что моделирование течений в Т-образном соединении по феноменологическим динамическим и скалярным (тепловым и диффузионным) двухпараметрическим моделям (связанным с RANS/URANS методом) будет сопряжено со сложностями установления удовлетворительного соответствия процессов их экспериментальным аналогам в силу невозможности корректного описания уровней изменений пульсаций скоростного и температурного полей в рассматриваемых геометрических конфигурациях.

Для преодоления указанных выше проблем в моделировании неизотермических течений Дж. Фенгом [66] применялась надежная, по его мнению, URANS модель второго поколения. Оценивалась эффективность подхода на основе структурной гибридной турбулентности (STRUCT) (например, [68]) для моделирования неизотермического смешения в Т-образном соединении. Рассчитанные значения распределений скорости и температуры в области смешения сравнивались с результатами других моделей, а также данными прямого моделирования (рис. 9, 10). Результаты данного исследования на основе STRUCT модели позволяют утверждать, что в целом имеется хорошее согласие расчетов с данными расчетов по методу крупных вихрей (LES) и прямого моделирования (DNS). В то же время в отношении деталей использования URANS моделей следует отметить [66], что использование STRUCT метода позволяет точно определять области с высокими значениями температурных колебаний. Модель успешно фиксирует динамику низкочастотных вихрей. Однако она ограничена в прогнозировании характерных частот больших турбулентных вихрей в области неполного перемешивания. В целом можно заключить, что STRUCT модель демонстрирует значительные перспективы в описании неизотермических перемешивающихся течений, а также корректна при прогнозах эволюции структуры течения потоков на грубых сетках. В частности, из рис. 9 следует, что модели успешно реагируют на изменение параметров в зонах с экстремальными значениями, характерных для смешения сдвиговых слоев.

Д.Г. Канг [67] выполнил моделирование сложных течений с использованием подхода отсоединенных вихрей (DES), который представляет собой гибридную модель турбулентности, сочетающую метод, в котором применяются идеи осреднения определяющих уравнений по Рейнольдсу (RANS) с элементами метода моделирования крупных вихрей (LES) (например, [69, 70]). Результаты показывают, что модель имеет преимущества с точки зрения вычислительных затрат на ее реализацию. Однако вопросы ее применимости в инженерных расчетах требуют дополнительного обоснования на классе подобных течений и составляют предмет перспективных исследований. В [67] выполнен анализ данных, полученных с использованием DES, в сравнении с ранее упомянутым экспериментом о неизотермическом течении в канале с Т-образным соединением [13], в том числе и в целях оценки работоспособности модели в широких условиях течений. Так, оказалось, что значения

осредненных и пульсационных величин поля скорости в целом хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Однако уровень турбулентности, описываемый пульсациями поля скорости, часто оказывается заниженным. Также расчеты теплового осредненного и пульсационного полей показали, что результаты в целом также были в хорошем со-

гласии с экспериментом, но в области разделения потоков наблюдались значительные отклонения расчетной (осредненной) температуры от соответствующей измеренной. Это позволяет утверждать, что в слое смешения и в мелкомасштабных и низкорейнольдсовых областях прогнозируемое пульсационное течение не развивается полностью.

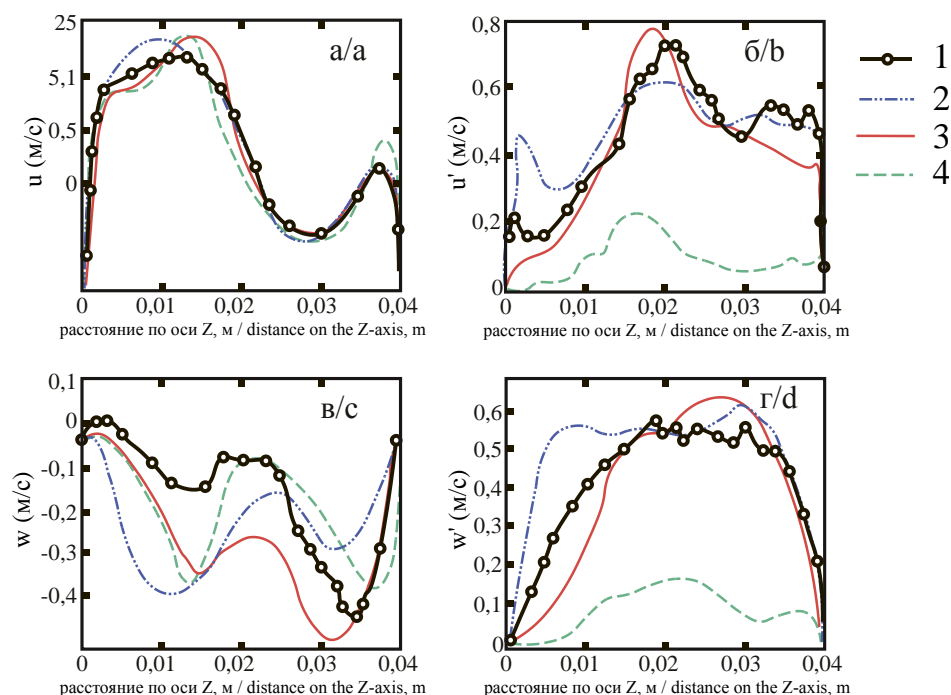


Рис. 9. Радиальные распределения осредненной (а, в), пульсационной (осевой (б)) и тангенциальной (г) составляющих вектора скорости, рассчитанных различными методами (1 – DNS, 2 – LES, 3 – STRUCT, 4 – URANS). Результаты соответствуют данным [66]

Fig. 9. Radial distributions of the averaged (a, c), pulsated (axis (b)) and tangential (d) components of the velocity vector, calculated at different methods (1 – DNS, 2 – LES, 3 – STRUCT, 4 – URANS). The results are consistent with the data [66]

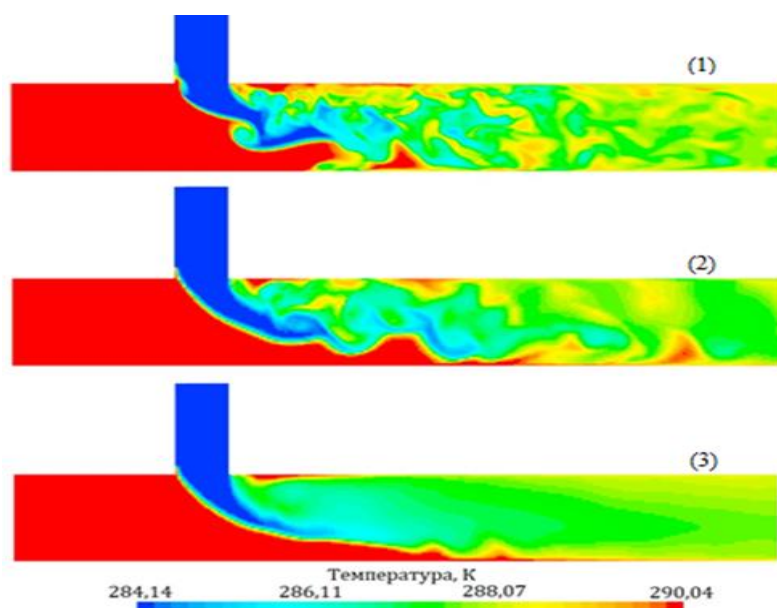


Рис. 10. Распределения актуальных значений температурного поля в канале с T-соединением (1 – LES, 2 – STRUCT, 3 – URANS). Результаты соответствуют данным [66]

Fig. 10. Distributions of temperature in a channel with the T-connection (1 – LES, 2 – STRUCT, 3 – URANS). Results are consistent with the data [66]

Преимущества моментного подхода (RANS) и его опорных двухпараметрических баз

Многие процессы перемешивания УВ потоков в закрытых элементах НГО требуют комплексного анализа изменений поля давления и его осевого градиента, находящихся в неразрывной и взаимной зависимости с самим процессом течения и тепло- и массо-переноса. Особенности интенсификации последних при переменных тепло- и реофизических свойствах смешивающихся потоков могут вызывать явления, неблагоприятные для функционирования оборудования, например, серьезную перестройку течения при появлении областей с $\frac{\partial P}{\partial x} > 0$ из-за формирования периферийных и центральных зон циркуляционного течения, которых на практике следует избегать [20, 71]. Тенденция к рециркуляциям может быть охарактеризована значениями таких параметров, как полный массовый расход в устройстве (Q), интегралом давления – импульса (Ω), а также их комбинациями:

$$Q = \int_f \rho U df, \quad \Omega = \int_f (P + \rho U^2) df.$$

Поэтому в рассматриваемых процессах вопрос корректного описания структуры пульсационного течения УВ сред в каналах с соединениями, ответственного за механизмы диффузионного перемешивания, взаимодействия с пульсациями поля давления, а также перераспределения напряжений за счет давления, весьма важен при выборе подхода и моделей инженерного расчета. С этой точки зрения полезны заключения об опыте исследования сложных сдвиговых внутренних течений и перспективах RANS/LES/DNS подхода [20, 57, 72]. В силу выше сказанного, представленная характеристика уровней моделирования турбулентного переноса при течениях вязких сред в системах с соединениями достаточно ценна в инженерных расчетах, т. к. детально информирует о степени идеализации физической картины и круге проблем для точного прогноза особенностей внутренних течений углеводородных сред как гомогенных, так и гетерогенных смесей, осложненных не-изотермичностью, нестационарностью, переменностью теплофизических свойств, массовыми силами, реофизическими и фазовыми трансформациями. Главная сложность расчета таких систем связана с моделированием членов типа источника в уравнении диссипации (ϵ), процессов деформации за счет давления [49, 73]. Современные результаты расчетов и экспериментов рассматриваемых течений показывают, что моделирование многомасштабности вихрей в рамках RANS подхода с замыканиями типа $k-\omega/\epsilon$ нетривиальное дело: постановка проблемы требует включения краевой задачи с реальными значениями всего спектра осредненных и пульсационных параметров процесса. Этот вопрос достаточно подробно обсуждается в [49, 71–74], где приведены сведения о сложностях и ограничениях применения RANS- ω/ϵ моделей второго порядка в расчетах сложных пото-

ков. Несмотря на указанные сложности, отметим принципиальное основание, заставляющее обращаться в расчетах сложных сдвиговых течений к многопараметрическим моделям второго порядка для напряжений Рейнольдса и удельных турбулентных скалярных потоков (тепла и массы). Так, при исследовании турбулентной природы рассматриваемых течений почти всегда предпочтителен подход с непосредственным расчетом напряжений и потоков по транспортным уравнениям и kL -опорной базой из уравнений для кинетической энергии турбулентности (k) и ее интегрального масштаба энергосодержащих вихрей (L). Краткая формулировка RANS- kL модели, а также детали ее замыканий для гомогенной среды приведены в [20, 75].

Особенности эволюции динамической структуры с эффектами отрыва при входе магистрального потока в секции переменного (скачок) поперечного сечения и точности расчета интенсивности течения в рециркуляционных зонах иллюстрируют данные рис. 11, 12. Видно, что используемая вычислительная технология вполне успешна для контроля процессов в энергонапряженных областях соединений с особенностями изменений поверхности стенки трубопровода.

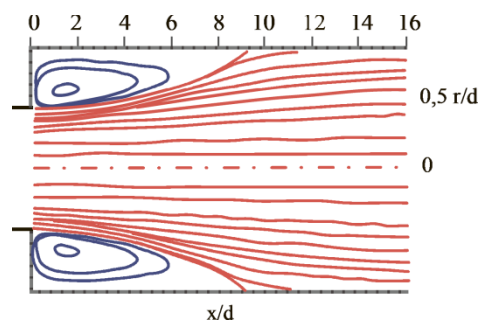


Рис. 11. Семейство рассчитанных линий тока при течения капельной среды в трубопроводе переменного поперечного сечения (уступ). Данные отвечают случаю: $h/R=0,5$, $Re=211,1$. Картина соответствует данным режима [76]

Fig. 11. Set of calculated flow lines during the drip media in the pipeline of variable cross-section (ledge). The data respond to the case: $h/R=0,5$, $Re=211,1$. The picture corresponds to the data of the regime [76]

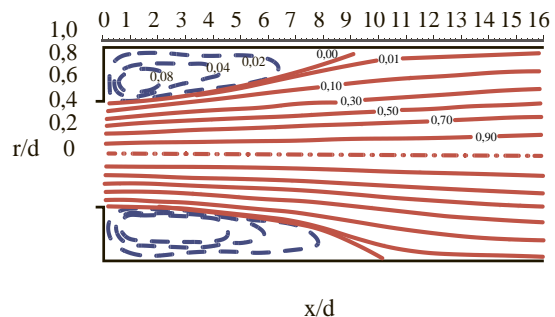


Рис. 12. Семейство линий тока жидкости в трубе при течения через уступ. Эксперимент при $h/R=0,5$, $Re=211,1$, линии уровня – данные [76]

Fig. 12. Set of lines of liquid flow in the pipe when moving through the ledge. Experiment corresponds $h/R=0,5$, $Re=211,1$, the flow lines are data [76]

Отдельные результаты расчета локальных и интегральных параметров течения УВ ньютоновской каплевой вязкой жидкости в Т-соединении иллюстрируют данные, представленные на рис. 13 (сопротивления трения по поверхности узла) и рис. 14 (безразмерной величины интегрального масштаба энергосодержащих вихрей) [17].

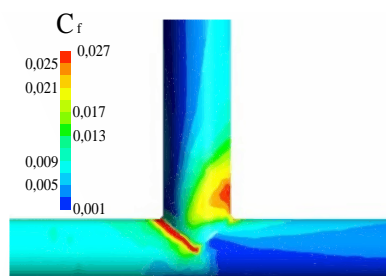


Рис. 13. Картина изменений сопротивления трения (C_f) по поверхности Т-соединения ($Re=10^5$) [17, 18]

Fig. 13. Picture of coefficient friction (C_f) changes on the T-junction surface ($Re=10^5$) [17, 18]

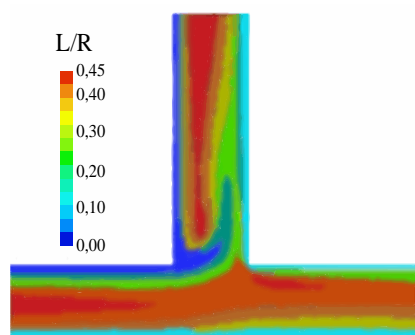


Рис. 14. Изменения интегрального масштаба (L/R) турбулентности по поверхности Т-соединения ($Re=10^5$) [17, 18]

Fig. 14. Changes of the integral scale (L/R) of turbulence on the T-junction surface ($Re=10^5$) [17, 18]

Из рис. 13, 14 видно, что процесс разделения течения из основной магистрали в патрубок приводит к неоднородной картине энергонапряженности по поверхности соединения. Последнее связано со сложным характером конвективно-диффузионного взаимодействия процессов переноса импульса в локальных областях пристеночного течения, отрывом и присоединением, ускорением и торможением потока в пристеночных областях, а также с изменением интенсивности турбулентности по рабочему пространству соединения. В таких условиях предъявляются повышенные требования к модели и ее способности учитывать ламинарно-турбулентные эффекты. Отдельные результаты изменения структуры течения и теплообмена в каплевой несжимаемой вязкой среде при ее течении в канале с несимметричным входом, представленные на рис. 15, 16, позволяют судить о высокой степени достоверности прогноза переходных процессов. Это позволяет надеяться на адекватность эволюции сопротивления по поверхности соединения и рекомендовать подход к исследованию функционирования оборудования в трубопроводах с Т-соединениями.

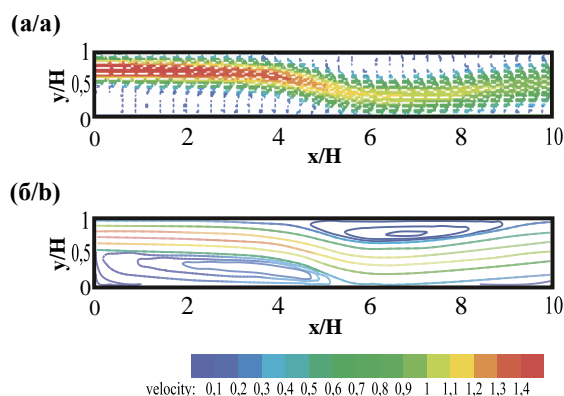


Рис. 15. Распределение значений векторного поля скорости (а) сверху и линий тока (б) снизу при течении жидкости в канале с несимметричным расширением. Высота уступа $h/H=0,5$ ($Re=880$)

Fig. 15. Distribution of the values of the vector velocity field (a) top and flow lines (b) bottom when the fluid flows in the channel with asymmetrical expansion. The height of the ledge is $h/H=0,5$ ($Re=880$)

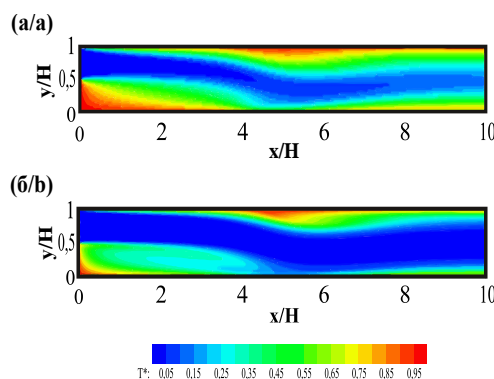


Рис. 16. Распределение значений безразмерного температурного поля $T^*=(T-T_{in})/(T_w-T_{in})$ для течения воздуха (а) сверху и воды (б) снизу по каналу с несимметричным расширением ($Re=640$)

Fig. 16. Distribution of the values of the dimensionless temperature field: $T^*=(T-T_{in})/(T_w-T_{in})$ for air flow (a) top and water (b) bottom through a channel with asymmetrical expansion ($Re=640$)

Таким образом, данные исследования вязких течений УВ сред, осложненных неизомеричностью, переменностью теплофизических свойств, в НГО с соединениями показывают, что почти отсутствуют экспериментальные сведения об изменениях характеристик турбулентности, полей скорости, температуры, состава смесей в конкретном узле соединения. В настоящий момент недостаток такого рода информации следует считать *неблагоприятным фактом*, препятствующим созданию инженерных моделей и методик прогноза аварийных процессов в соответствующих технических системах. Несмотря на это, представленная в работе информация о механизмах и эффектах смешения весьма полезна, т. к. способна дать обоснованные заключения о: *проблемах* подходов и их моделей к точному прогнозу процессов в Т-соединениях; перспективных *разработках* инженерных методов их эффективного расчета с целью увеличения надежности функционирования элементов газотранспортной сети.

Заключение

Представленные результаты показывают, что разработка современной техники и новых технологий, повышение надежности и долговечности эксплуатации НГО требуют увеличения точности их теплогидравлического расчета. Особенно это актуально для элементов устройств, включающих соединения сложной формы поверхности стенки и проходного сечения в области контакта основной магистрали газотранспортной системы и подводящих патрубков. Процессы течения в данных элементах осложнены специфическими эффектами, обусловленными перемешиванием потоков природного сырья при их слиянии/разделении в магистрали в широком диапазоне изменений режимов движения и теплообмена, реофизических свойств, состава смесей, характера действия внешних сил и т. д. Поэтому цель данной работы касалась выяснения особенностей смешения, установления закономерностей изменений гидродинамической и тепловой турбулентной структуры потоков в Т-образных соединениях, выработке представлений о моделях расчета и точности прогноза размеров энергонапряженных зон и интенсивности сопротивления и теплообмена, а также способах управления нагрузками.

Установлено, что комбинации параметров расхода, геометрических размеров и теплофизических свойств почти всегда способствуют возникновению турбулентных процессов в элементах газотранспортной сети, отличающихся: интенсивностью перераспределения кинетической и тепловой энергии за счет эффектов прямого и обратного перехода (реламинаризации); завихрением, перемешиванием фаз; стратификацией по плотности. Видно, что в практике инженерных расчетов актуальны сведения по систематизации знаний о эволюции вихревых течений по пространству узла соединения. Подчеркивается, что *концепция оценки* современных методов и моделей расчета внутренних течений в соединениях, результаты, привлекаемые для моделирования процессов смешения и обобщения указанных режимов на более широкий класс течений в условиях: *противоположности* направлений вынужденного течения и вектора термogravitационных сил (течение охлаждаемой жидкости снизу вверх по магистрали или нагреваемой жидкости сверху вниз); *ламинаризации* при воздействии различных факторов (диссипации, устойчивой стратификации, ускорения, вращения, нагрева, инъекции/отсоса), представляется *обоснованной* особенно при принятии решений о выборе модели и метода расчета. В силу того, что последние с разной степенью точности способны прогнозировать особенности течений в соединениях, важными являются системные сведения о прогнозах локальных и интегральных свойств течений с перемешиванием. С этой точки зрения результаты данной работы имеют следующее *практическое* значение.

1. Характер изменения динамической и тепловой структуры течений в каналах Т-образной формы показывает (например, рис. 13), что на начальном гидродинамическом участке неравномерность

распределения касательных напряжений по периметру узла соединения выражена и возрастает от сечения непосредственного соединения патрубка, а затем с удалением от него снижается до значений стабилизации течения. Эти особенности определяются процессами взаимодействия вихрей со стенками тройника (рис. 14) и механизмами, формирующими неоднородную турбулентную структуру в областях стенок и ядра течения (рис. 1–10), где существует движение организованных структур. Важно отметить, что в моделировании таких эффектов стоит с *осторожностью* относиться к прогнозам, выполненным по моделям, включающим понятие «скалярной» турбулентной вязкости. В условиях существования анизотропной структуры турбулентности в Т-соединениях расчет многомасштабности течения (рис. 7–9, 14) следует проводить по моделям высшего порядка (например, RANS- kL/kw , LES/DNS-подходам).

2. Анализ особенностей процессов в рециркуляционных зонах, их интенсивности (например, рис. 6, 9–12, 14–16) показывает, что спектр распределений динамических параметров в их центральных и периферийных областях хорошо согласуется с имеющимися экспериментами [21] и данными [61–64]. Установлено, что максимальное значение скорости, направленной против основного течения, сосредоточено в вихрях при $x/H < 10$, где H – высота уступа. Обнаружено, что в турбулентных режимах максимальные значения рейнольдсовых напряжений наблюдаются в областях, где поперечный градиент аксиальной скорости стремится к максимальным значениям в зоне, близкой к разделяющей линии тока, причем ниже по течению зона с экстремальными напряжениями отклоняется вверх. Также результаты указывают, что пиковые значения напряжений имеются в слое смешения и они сначала возрастают с увеличением расстояния вниз по течению. Далее при достижении максимума перед зоной повторного присоединения потока наблюдается тенденция к их уменьшению.

Таким образом, детальный анализ процессов в «тонкой» структуре течения показывает, что в слое смешения осевая компонента пульсаций вектора скорости доминирует в сравнении с соответствующей радиальной и азимутальной компонентами. Причем при присоединении, когда продольная скорость деформации выражена, вблизи поверхности наблюдается увеличение уровня пульсаций радиальной и азимутальной компонент вектора скорости. Характер распределений кинетической энергии турбулентности, интегрального масштаба энергосодержащих вихрей в представленных областях соединений позволяет заключить, что, несмотря на уменьшение их интенсивности в слоях смешения, они остаются в большей части рециркуляционных областей существенной составляющей, способствующей генерации турбулентности. Поэтому требуются эффективные методы расчета *диффузионных механизмов*, определяющих по-

ведение этих величин, чувствительных к изменению анизотропной структуры.

3. С целью получения дополнительной информации о точках отрыва и корректности их прогноза в соединениях целесообразно иметь контрольные экспериментальные данные эволюции углеводородных структур в широком диапазоне изменений поля температуры, давления. В частности, так как сдвиговой слой смещения (между ядром потока и рециркуляционной зоной) развивается по криволинейным траекториям, для подтверждения наблюдаемых в расчетах специфических изменений *локальных свойств* вихревого течения в отрывной и рециркуляционной областях будут востребованы современные методы бесконтактной регистрации (лазерная велосимметрия), фиксирующие детали пространственных изменений компонент полного тензора напряжений Рейнольдса, корреляций пульсаций поля скорости и скаляра потоков скалярной субстанции. Эти данные составляют предмет для *понимания, прогнозирования, развития и проверки* математических моделей турбулентности RANS подходом, а также моделированием крупных вихрей. Стоит заметить, что последний обладает большим потенциалом в исследованиях закономерностей интегральных параметров сложных вихревых течений в Т-соединениях произвольной формы поперечного сечения, таких как размер, форма, интенсивность

циркуляционных зон, а также при изучении разнообразных вторичных течений, возбуждаемых давлением, нетривиальным характером распределений нормальных рейнольдсовых напряжений.

4. Применительно к задачам НГО результаты позволяют отметить, что представление о сути процессов в технических системах осложнено необходимостью задания реальных краевых условий: поля кинетической энергии и масштаба турбулентности, напряжений Рейнольдса. Последние либо отсутствуют, либо сформулированы не должным образом, что ограничивает возможности численного моделирования. Например, существует значительный разброс этих данных даже для отдельной реализации. В этом смысле сведения о механизмах процессов переноса, формирующих физику сдвиговых анизотропных потоков в соединениях: *порождении* энергии осредненным и пульсационным движением, *диффузии* турбулентности, *перераспределения* за счет корреляций пульсаций давления со скоростями деформаций и *диссипации*, необходимо корректно описывать и представлять в безразмерном виде. Это позволит минимизировать использование модельных констант при анализе более общих явлений, осуществить разумное обобщение модели и продемонстрировать надежность методов исследования течений с отрывом и смещением потоков в рабочих элементах нефтегазового оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парфенов Д.В. Предупреждение нагрева элементов крановых узлов при заполнении газом участков магистральных газопроводов: дис. ... канд. техн. наук. – Ухта, 2018. – 189 с.
2. Hu L., Kazimi M.S. LES benchmark study of high cycle temperature fluctuations caused by thermal striping in a mixing tee // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2006. – V. 27. – P. 54–64.
3. Characterization of thermal striping in liquid sodium with optical fiber sensors / M. Weathered, J. Rein, M. Anderson, P. Brooks, B. Coddington // *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*. – 2017. – V. 3. – P. 041003-1–041003-9.
4. Numerical and experimental study on turbulent thermal mixing in a T-junction flow / N. Fukushima, K. Fukagata, N. Kasagi, H. Noguchi, K. Tanimoto // *The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*. – Big Island of Hawaii, Hawaii, 2003. – P. 16–20.
5. De Tilly A., Sousa J. An experimental study of heat transfer in a two dimensional T-junction operating at a low momentum flux ratio // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – V. 51. – № 3. – P. 941–947.
6. Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping / H. Kamide, M. Igarashi, S. Kawashima, N. Kimura, K. Hayashi // *Nuclear Engineering and Design*. – 2009. – V. 239. – № 1. – P. 58–67.
7. Experimental study on turbulent mixing process in cross-flow type T-junction / M. Hirota, E. Mohri, H. Asano, H. Goto // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2010. – V. 31. – № 5. – P. 776–784.
8. Thermal mixing in T-junctions / V.S. Naik-Nimbalkar, A.W. Patwardhan, I Banerjee, G. Padmakumar, G. Vaidyanathan // *Chemical Engineering Science*. – 2010. – V. 65. – № 22. – P. 5901–5911.
9. Kuschewski M., Kulecovic R., Laurien E. Experimental setup for the investigation of fluid – structure interactions in a T-junction // *Nuclear Engineering and Design*. – 2013. – V. 264. – P. 223–230.
10. Lin C.H., Chen M.S., Ferng Y.M. Investigating thermal mixing and reverse flow characteristics in a T-junction by way of experiments // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 99. – P. 1171–1182.
11. Investigations on mixing phenomena in single-phase flow in a T-junction geometry / C. Walker, M. Simiano, R. Zboray, H.M. Prasser // *Nuclear Engineering and Design*. – 2009. – V. 239. – № 1. – P. 116–126.
12. Hosseini S.M., Yuki K., Hashizume H. Classification of turbulent jets in a T-junction area with a 90-deg bend upstream // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – V. 51. – P. 2444–2454.
13. Westin J., Veber P., Andersson L. High-cycle thermal fatigue in mixing tees. Large - eddy simulations compared to a new validation experiment // *Proc. of the 16th International Conference on Nuclear Engineering*. – Orlando, Florida, 2008. – P. 515–525.
14. Measurement and calculations of laminar flow in a ninety degree bifurcation / D. Liepsch, S. Moravee, A.K. Rastogi, N.S. Vlachos // *Journal of Biomechanics*. – 1982. – V. 15. – P. 473–485.
15. Sierra-Espinosa F.Z., Bates C.J., O'Doherty T. Turbulent flow in a 90° pipe junction. P. 2: Reverse flow at the branch exit // *Computers and Fluids*. – 2000. – V. 29. – P. 215–233.
16. Costa N.P., Maia R., Proenca M.F. Edge effects on the flow characteristics in a 90 deg tee junction // *Journal of Fluids Engineering*. – 2006. – V. 128. – № 6. – P. 1204–1217.
17. Альгинов Р.А. Численное моделирование закономерностей течения вязких сред в трубопроводах с соединениями сложной формы: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2014. – 119 с.
18. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Specific aspect of turbulent flow separation in nodes and junctions of pipelines // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2014. – V. 21. – P. 1–5.
19. Smith B., Mahaffy J., Angele K. A CFD benchmarking exercise based on flow mixing in a T-junction // *Nuclear Engineering and Design*. – 2013. – V. 264. – P. 80–88.
20. Харламов С.Н., Фатьянов Д.С. Исследование структуры турбулентного течения природного сырья в трубопроводах с секцией переменного по длине поперечного сечения конфузори-

- диффузорного типа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 53–67.
21. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Томский государственный университет, 2001. – 448 с.
 22. Georgiou M., Papalexandris M. V. Direct numerical simulation of turbulent heat transfer in a T-junction // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2018. – V. 845. – P. 581–614.
 23. Georgiou M., Papalexandris M. V. Turbulent mixing in T-junctions: the role of the temperature as an active scalar // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – V. 117. – P. 793–809.
 24. Progress in hybrid RANS-LES modelling // 7th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods / Eds. Y. Hoarau, Sh.-Hui Peng, D. Schwaborn, A.J. Revell, Ch. Mockett. – Berlin, Germany, 17–19 September, 2018. – Cham, Switzerland: Springer International Publ., 2020. – 412 p.
 25. Rodriguez S. Applied computational fluid dynamics and turbulence modeling: practical tools, tips and techniques. – Cham, Switzerland: Springer International Publ., 2019. – 306 p.
 26. Turbulence and interactions // *Proc. of the TI 2018 Conference* / Eds. M. Deville, Ch. Calvin, V. Couaillier, M. de La Llave Plata, J.-L. Estivalèzes, Th. Hiệp Lê, St. Vincent. – Les Trois-Îlets, Martinique, France, June 25–29, 2018. – Cham, Switzerland: Springer International Publ., 2021. – 218 p.
 27. Sengupta T.K., Bhaumik S. DNS of wall-bounded turbulent flows: a first principle approach. – Singapore: Springer, 2019. – 358 p.
 28. Eckert M. The turbulence problem: a persistent riddle in historical perspective. – Cham, Switzerland: Springer International Publ., 2019. – 107 p.
 29. Philipp T.L., Nguyen J.C., Uribe I.A., Laurence D.R. A dual-grid hybrid RANS/LES model for under-resolved near-wall regions and its application to heated and separating flows // *Flow, turbulence and combustion*. – 2020. – V. 104. – P. 835–859.
 30. Gavioli Y.S., Aibe V.Y., Loureiro J.B.R. Gas-liquid flow through an inclined T-junction with a vertical-upward branch // *Flow, turbulence and combustion*. – 2019. – V. 103. – P. 1011–1037.
 31. Azzopardi B.J., Smith P.A. Two-phase flow split at T-junctions: effect of side arm orientation and downstream geometry // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1992. – V. 18. – P. 861–875.
 32. Baker G. Separation and control of gas-liquid flows at horizontal T-junctions: PhD Thesis. – Nottingham, 2003. – 315 p.
 33. Transient effects in gas-liquid phase separation at a pair of T-junctions / G. Baker, W.W. Clark, B.J. Azzopardi, J.A. Wilson // *Chemical Engineering and Science*. – 2008. – V. 63. – P. 968–976.
 34. Penmatcha V.R., Ashton P.J., Shoam O. Two-phase flow splitting at a T-junction with an inclined branch arm // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1996. – V. 22. – № 6. – P. 1105–1122.
 35. Azzopardi B. Measurements and observations of the split of annular flow at a vertical T-junction // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1988. – V. 14. – P. 701–710.
 36. A T-junction device allowing for two simultaneous orthogonal views: application to bubble formation and break-up / D. Caprini, G. Sinibaldi, L. Marino, C.M. Casciola // *Microfluidics and Nanofluidics*. – 2018. – V. 22. – № 85. – P. 1–16.
 37. Azzopardi B.J. Phase separation at T-junctions // *Multiphase Science and Technology*. – 2000. – V. 11. – P. 223–329.
 38. Paes P.L.K., Yuan Xuan. Numerical investigation of turbulent kinetic energy dynamics in chemically-reacting homogeneous turbulence // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2018. – V. 101. – P. 775–794.
 39. Numerical analysis of thermal striping induced high cycle thermal fatigue in a mixing tee / J.I. Lee, L.-W. Ho, P. Saha, M.S. Kazimi // *Nuclear Engineering and Design*. – 2009. – V. 239. – № 5. – P. 833–839.
 40. Computational study of conjugate heat transfer in T-junctions / S. Kuhn, O. Brailard, B. Niceno, H.M. Prasser // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – V. 240. – № 6. – P. 1548–1557.
 41. Large-eddy simulations (LES) of temperature fluctuations in a mixing tee with/without a porous medium / T. Lu, P.X. Jiang, Z.J. Gou, Y.W. Zhang, H. Li // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2010. – V. 53. – P. 4458–4466.
 42. Sakowitz A., Mihaescu M., Fuchs L. Turbulent flow mechanisms in mixing T-junctions by large eddy simulations // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2014. – V. 45. – P. 135–146.
 43. Large eddy simulation studies on the influence of turbulent inlet conditions on the flow behavior in a mixing tee / P. Gauder, P.K. Selvam, R. Kulecovic, E. Laurien // *Nuclear Engineering and Design*. – 2016. – V. 298. – P. 51–63.
 44. T-junction cross-flow mixing with thermally driven density stratification / J. Kickhofel, H.M. Prasser, P.K. Selvam, E. Lauren, R. Kulecovic // *Nuclear Engineering and Design*. – 2016. – V. 309. – P. 23–39.
 45. Lessani B., Zainali A. Numerical investigation of stably stratified turbulent channel flow under non-Boussinesq conditions // *Journal of Turbulence*. – 2009. – V. 10. – P. 1–25.
 46. Zonta F., Onorato M., Soldati A. Turbulence and internal waves in stably stratified channel flow with temperature-dependent fluid properties // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2012. – V. 697. – P. 175–203.
 47. Selvam P.K., Kulecovic R., Lairien E. Large eddy simulation on thermal mixing of fluids in a T-junction with conjugate heat transfer // *Nuclear Engineering and Design*. – 2015. – V. 284. – P. 238–246.
 48. Howard R.J., Serre E., Large-eddy simulation in a mixing tee junction: high order turbulent statistics analysis // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2015. – V. 51. – P. 65–77.
 49. Prospects of RANS models with multiparameter effects at simulation of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface / S.N. Kharlamov, V.Yu. Kim, S.I. Silvestrov, R.A. Alginov, S.A. Pavlov // *The 6th Proc. of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. – Harbin, China, August 22–24, 2011. – V. 2. – P. 787–791.
 50. Georgiou M., Papalexandris M.V. Numerical study of turbulent flow in a rectangular T-junction // *Physics of fluids*. – 2017. – V. 29. – № 6. – P. 065106–1–065106–17.
 51. Kharlamov S.N., Islyamov I.Sh. Optimization of the liquid hydrocarbons pipeline transport with using a vortex effect and inductive heating of metallic additives // *The Proc. of the 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2012)*. – Tomsk, Russia, September 21–24, 2012. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357803.
 52. Jayaraju S., Komen E., Baglietto E. Suitability of wall-functions in large eddy simulation for thermal fatigue in a T-junction // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – V. 240. – № 10. – P. 2544–2554.
 53. Benchmarking LES with wallfunctions and RANS for fatigue problems in thermal-hydraulics systems / R. Tunstall, D. Laurence, R. Prosser, A. Skillen // *Nuclear Engineering and Design*. – 2016. – V. 308. – P. 170–181.
 54. Large eddy simulation of a T-junction with upstream elbow: the role of dean vortices in thermal fatigue / R. Tunstall, D. Laurence, R. Prosser, A. Skillen // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 107. – P. 672–680.
 55. Launder B.E., Sharma B.I. Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc // *Letters in Heat and Mass Transfer*. – 1974. – V. 1. – № 2. – P. 131–138.
 56. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique / V. Yakhot, S.A. Orszag, S. Thangam, T.B. Gatski, C.G. Speziale // *Physics of Fluids*. – 1992. – Ser. A. – V. 4. – № 7. – P. 1510–1520.
 57. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I. Numerical modelling of a vortical investigation of heat transfer in fields of centrifugal mass forces in elements of the power equipment with a curvilinear wall // *The 5th Proc. of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. – Ulsan, Korea, October, 13–15, 2010. – P. 105–109.
 58. Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junctions using URANS and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFX / Th. Frank, C. Lifante, H.-M. Prasser, F. Menter // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – V. 240. – P. 2313–2328.
 59. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. – 1994. – V. 32. – № 8. – P. 1598–1605.
 60. Menter F.R. Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows // *NASA TM*. – 1992. – V. 10. – № 103975. – P. 1–35.

61. Speziale C.G., Sarkar S., Gatski T.B. Modeling the pressure-strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1991. – V. 227. – P. 245–272.
62. Numerical simulations of flow through channels with T-junction / L. Beneš, P. Louda, K. Kozel, R. Keslerova, J. Štigler // *Applied Mathematics and Computation*. – 2013. – V. 219. – P. 7225–7235.
63. Craft T.J., Launder B.E., Suga K. Development and application of the cubic eddy-viscosity model of turbulence // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 1996. – V. 17. – P. 108–115.
64. Naji H., Mompean G., Yahyaoui O.EI. Evaluation of explicit algebraic stress models using direct numerical simulations // *Journal of Turbulence*. – 2004. – № 5. – P. 38–63.
65. Höhne T. Scale resolved simulations of the OECD/NEA-Vattenfall T-junction benchmark // *Nuclear Engineering and Design*. – 2014. – V. 269. – P. 149–154.
66. Feng J., Frahi T., Baglietto E. Structure-based URANS simulation of thermal mixing in T-junctions // *Nuclear engineering and design*. – 2018. – V. 340. – P. 275–299.
67. Kang D.G., Na H., Lee C.Y. Detached eddy simulation of turbulent and thermal mixing in a T-junction // *Annals of Nuclear Energy*. – 2019. – V. 124. – P. 245–256.
68. Lenci G.A. Methodology based on local resolution of turbulent structures for effective modeling of unsteady flows: Ph.D. Thesis. – Massachusetts, 2016. – 200 p.
69. Madabhushi R.K., Vanka S.P. Large-eddy simulation of turbulence-driven secondary flow in a square duct // *Physics of Fluids*. – 1991. – Ser. A. – V. 3. – № 11. – P. 2734–2745.
70. Vazquez M.S., Métais O. Large eddy simulation of the turbulent flow through a square duct // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2002. – V. 453. – P. 201–238.
71. Jean Piquet. *Turbulent Flows: Models and Physics*. – Berlin: Springer – Verlag Heidelberg, 1999. – 762 p.
72. Bayode Owolabi. *Characterisation of turbulent duct flows: experiments and direct numerical simulations*. – Cham, Switzerland: Springer International Publ., 2019. – 141 p.
73. *Theories of Turbulence* / Eds. M. Oberlack, F.H. Buss. – Wien: Springer-Verlag, 2002. – 373 p.
74. Sagaut P., Cambon C. *Homogeneous turbulence dynamics*. – Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. – 897 p.
75. Kharlamov S.N. Heat and mass transfer in facilities with a moving piston // *Heat transfer research*. – 2007. – V. 38. – № 3. – P. 233–243.
76. Hammad K.J., Ötügen M.V., Arik E.B. A PIV study of the laminar axisymmetric sudden expansion flow // *Experiments in Fluids*. – 1999. – № 26. – P. 266–272.

Поступила 01.03.2021 г.

Информация об авторах

Харламов С.Н., доктор физико-математических наук, профессор, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Фатьянов Д.С., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC504.61:532.5426:536.252

SIMULATION OF VISCOUS MEDIA SPATIAL FLOWS IN THE SYSTEM OF CHANNELS WITH SECTIONS OF COMPLEX FORM JUNCTIONS

Sergey N. Kharlamov¹,
kharsn@mail.ru

Dmitriy S. Fatyanov¹,
dsf5@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the research is determined by the need to analyze the features of the workflow in machines with junctions of arbitrary geometry, combining/separating the flows of viscous media, in order to accurately and carefully predict the contingencies of their functioning due to the expressed thermal and dynamic loads caused by the effects of separation, detachment, pressure, the evolution of the structure of complex, shear, non-isothermal internal flows when at contact with the wall; reasonable choice, taking into account the possibilities of modern computing technology, the most natural approach of studying the spatial and unsteady nature of flows in these technical systems.

The aim of this paper is to understand the problems of the modern level of research of flows in T-shaped channels, which are one of the main elements of technical equipment in the oil and gas industry; to establish the value of the existing results of experimental and theoretical analysis of complex shear flows in order to improve methods that contribute to an increase in the operational and structural level of the devices under high dynamic and thermal loads; to define the data for verification of models capable of more reliably predicting features of currents and heat and mass transfer in pipes; to give recommendations to the practice of calculating reliability of devices with T-shaped sections.

Methodology: complex theoretical and experimental methods of analysis of hydrodynamics and heat and mass transfer at viscous-inertial laminar and turbulent flows of hydrocarbon drop and gaseous viscous media in internal systems with T-connections of the main and branch pipe.

Results. The authors have carried out a critical review of modern data, modeling methods and models of studies of hydrodynamics and heat exchange processes when mixing drip and gaseous flows in elements of pipeline networks in a wide range of changes in mode and geometric parameters (T-connections, symmetrical/asymmetric expansion, $Re=10^2 \dots 10^7$, $M<0,3 \dots 0,7$). The paper presents the features that form the structure of currents in individual elements of equipment used in the oil and gas industry (crane assembly bindings). It was found that rounding of connection angles can reduce energy loss in branch pipe by 10–20 %. Details of vortex structure changes were analyzed by visualization/contactless recording methods. A classification of structures useful in formulating edge problems in mathematical modeling of processes at the Petroleum and Gas Devices is given. It is noted that the use of wall functions for modeling flows in T-connections can lead to an erroneous assessment of the level of pulsations of temperature and dynamic fields in wall regions. It is emphasized that the disengagement of flows, the growth of energy stress in local sections of the connection are sensitive to the nature of convective-diffusion interaction of momentum, heat transfer processes, separation, connection, local acceleration/braking mechanisms, turbulization of flow in wall regions. These features can be successfully predicted by modern models that take into account the specifics of flows with heterogeneous anisotropic turbulence. In conclusion, recommendations are given on prediction of local and integral properties of mixed flows, as well as problems having fundamental and applied significance that make up the subject of promising research.

Key words:

Channels, T-junctions, streams, turbulence, non-isothermicity, models, methods, modeling, structure, regularities.

REFERENCES

1. Parfenov D.V. *Preduprezhdenie nagreva elementov kranovykh uzlov pri zapolnenii gazom uchastkov magistra'nykh gazoprovodov*. Diss. Kand. nauk [Prevention of heating of crane components while filling sections of main gas pipelines with gas. Cand.e Diss.]. Ukhta, 2018. 189 p.
2. Hu L., Kazimi M.S. LES benchmark study of high cycle temperature fluctuations caused by thermal striping in a mixing tee. *International journal of heat and fluid flow*, 2006, vol. 27, pp. 54–64.
3. Weathered M., Rein J., Anderson M., Brooks P., Coddington B. Characterization of thermal striping in liquid sodium with optical fiber sensors. *Journal of nuclear engineering and radiation science*, 2017, vol. 3, pp. 041003-1–041003-9.
4. Fukushima N., Fukagata K., Kasagi N., Noguchi H., Tanimoto K. Numerical and experimental study on turbulent thermal mixing in a T-junction flow. *The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*. Big Island of Hawaii, Hawaii, 2003. pp. 16–20.
5. De Tilly A., Sousa J. An experimental study of heat transfer in a twodimensional T-junction operating at a low momentum flux ratio. *International journal of heat and mass transfer*, 2008, vol. 51, no. 3, pp. 941–947.
6. Kamide H., Igarashi M., Kawashima S., Kimura N., Hayashi K. Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping. *Nuclear engineering and design*, 2009, vol. 239, no. 1, pp. 58–67.
7. Hirota M., Mohri E., Asano H., Goto H. Experimental study on turbulent mixing process in cross-flow type T-junction. *International journal of heat and fluid flow*, 2010, vol. 31, no. 5, pp. 776–784.
8. Naik-Nimbalkar V.S., Patwardhan A.W., Banerjee I., Padmakumar G., Vaidyanathan G. Thermal mixing in T-junctions. *Chemical engineering science*, 2010, vol. 65, no. 22, pp. 5901–5911.
9. Kuschewski M., Kulecovic R., Laurien E. Experimental setup for the investigation of fluid – structure interactions in a T-junction. *Nuclear engineering and design*, 2013, vol. 264, pp. 223–230.
10. Lin C.H., Chen M.S., Ferng Y.M. Investigating thermal mixing and reverse flow characteristics in a T-junction by way of experiments. *Applied thermal engineering*, 2016, vol. 99, pp. 1171–1182.
11. Walker C., Simiano M., Zboray R., Prasser H.M. Investigations on mixing phenomena in single-phase flow in a T-junction geometry. *Nuclear engineering and design*, 2009, vol. 239, no. 1, pp. 116–126.

12. Hosseini S.M., Yuki K., Hashizume H. Classification of turbulent jets in a T-junction area with a 90-deg bend upstream. *International journal of heat and mass transfer*, 2008, vol. 51, pp. 2444–2454.
13. Westin J., Veber P., Andersson L. High-cycle thermal fatigue in mixing tees. Large - eddy simulations compared to a new validation experiment. *Proc. of the 16th International Conference on Nuclear Engineering*. Orlando, 2008. pp. 515–525.
14. Liepsch D., Moravee S., Rastogi A.K., Vlachos N.S. Measurement and calculations of laminar flow in a ninety degree bifurcation. *Journal of biomechanics*, 1982, vol. 15, pp. 473–485.
15. Sierra-Espinosa F.Z., Bates C.J., O'Doherty T. Turbulent flow in a 90° pipe junction. P. 2: Reverse flow at the branch exit. *Computers and fluids*, 2000, vol. 29, pp. 215–233.
16. Costa N.P., Maia R., Proenca M.F. Edge effects on the flow characteristics in a 90 deg tee junction. *Journal of fluids engineering*, 2006, vol. 128, no. 6, pp. 1204–1217.
17. Alginov R.A. *Chislennoe modelirovanie zakonornostey techeniy vyazkikh sred v truboprovodakh s soedineniyami slozhnoy formy*. Diss. Kand. nauk [Numerical modeling of patterns of the flow of viscous media in pipelines with complex form junctions. Cand. Diss.]. Tomsk, 2014. 119 p.
18. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Specific aspect of turbulent flow separation in nodes and junctions of pipelines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, pp. 1–5.
19. Smith B., Mahaffy J., Angele K. A CFD benchmarking exercise based on flow mixing in a T-junction. *Nuclear engineering and design*, 2013, vol. 264, pp. 80–88.
20. Kharlamov S.N., Fatyanov D.S. Investigation of natural raw materials turbulent flow structure in pipelines at confuser-diffuser section. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 53–67. In Rus.
21. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. *Matematicheskie modeli neodnorodnoy anizotropnoy turbulentnosti vo vnutrennikh techeniyakh* [Mathematical models of inhomogeneous anisotropic turbulence at the internal flows]. Tomsk, Tomsk State University of Publ. House, 2001. 448 p.
22. Georgiou M., Papalexandris M.V. Direct numerical simulation of turbulent heat transfer in a T-junction. *Journal of fluid mechanics*, 2018, vol. 845, pp. 581–614.
23. Georgiou M., Papalexandris M.V. Turbulent mixing in T-junctions: the role of the temperature as an active scalar. *International journal of heat and mass transfer*, 2017, vol. 117, pp. 793–809.
24. Progress in hybrid RANS-LES modelling. *7th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods*. Eds. Y. Hoarau, Sh.-Hui Peng, D. Schwaborn, A.J. Revell, Ch. Mockett. Berlin, Germany, 17–19 September, 2018. Cham, Switzerland, Springer International Publ., 2020. 412 p.
25. Rodriguez S. *Applied computational fluid dynamics and turbulence modeling: practical tools, tips and techniques*. Cham, Switzerland, Springer International Publ., 2019. 306 p.
26. Turbulence and interactions. *Proc. of the TI 2018 Conference*. Eds. M. Deville, Ch. Calvin, V. Couaillier, M. de La Llave Plata, J.-L. Estivalèzes, Th. Hiệp Lê, S. Vincent. Les Trois-Îlets, Martinique, France, June 25–29, 2018. Cham, Switzerland, Springer International Publ., 2021. 218 p.
27. Sengupta T.K., Bhaumik S. *DNS of wall-bounded turbulent flows: a first principle approach*. Cham, Switzerland, Springer Singapore, 2019. 358 p.
28. Eckert M. *The turbulence problem: a persistent riddle in historical perspective*. Cham, Switzerland, Springer International Publ., 2019. 107 p.
29. Philipp T.L., Nguyen J.C., Uribe I.A., Laurence D.R. A dual-grid hybrid RANS/LES model for under-resolved near-wall regions and its application to heated and separating flows. *Flow, turbulence and combustion*, 2020, vol. 104, pp. 835–859.
30. Gavioli Y.S., Aibe V.Y., Loureiro J.B.R. Gas-liquid flow through an inclined T-junction with a vertical-upward branch. *Flow, turbulence and combustion*, 2019, vol. 103, pp. 1011–1037.
31. Azzopardi B.J., Smith P.A. Two-phase flow split at T-junctions: effect of side arm orientation and downstream geometry. *International journal of multiphase flow*, 1992, vol. 18, pp. 861–875.
32. Baker G. *Separation and control of gas-liquid flows at horizontal T-junctions*. PhD Thesis. Nottingham, 2003. 315 p.
33. Baker G., Clark W.W., Azzopardi B.J., Wilson J.A. Transient effects in gas-liquid phase separation at a pair of T-junctions. *Chemical engineering and science*, 2008, vol. 63, pp. 968–976.
34. Penmatcha V.R., Ashton P.J., Shoam O. Two-phase flow splitting at a T-junction with an inclined branch arm. *International journal of multiphase flow*, 1996, vol. 22, no. 6, pp. 1105–1122.
35. Azzopardi B. Measurements and observations of the split of annular flow at a vertical T-junction. *International journal of multiphase flow*, 1988, vol. 14, pp. 701–710.
36. Caprini D., Sinibaldi G., Marino L., Casciola C.M.A. T-junction device allowing for two simultaneous orthogonal views: application to bubble formation and break-up. *Microfluidics and nanofluids*, 2018, vol. 22, no. 85, pp. 1–16.
37. Azzopardi B.J. Phase separation at T-junctions. *Multiphase science and technology*, 2000, vol. 11, pp. 223–329.
38. Paes P.L.K., Yuan Xuan. Numerical investigation of turbulent kinetic energy dynamics in chemically-reacting homogeneous turbulence. *Flow, turbulence and combustion*, 2018, vol. 101, pp. 775–794.
39. Lee J.I., Ho L.-W., Saha P., Kazimi M.S. Numerical analysis of thermal striping induced high cycle thermal fatigue in a mixing tee. *Nuclear engineering and design*, 2009, vol. 239, no. 5, pp. 833–839.
40. Kuhn S., Braillard O., Niceno B., Prasser H.M. Computational study of conjugate heat transfer in T-junctions. *Nuclear engineering and design*, 2010, vol. 240, no. 6, pp. 1548–1557.
41. Lu T., Jiang P.X., Gou Z.J., Zhang Y.W., Li H. Large-eddy simulations (LES) of temperature fluctuations in a mixing tee with/without a porous medium. *International journal of heat and mass transfer*, 2010, vol. 53, pp. 4458–4466.
42. Sakowitz A., Mihaescu M., Fuchs L. Turbulent flow mechanisms in mixing T-junctions by large eddy simulations. *International journal of heat and fluid flow*, 2014, vol. 45, pp. 135–146.
43. Gauder P., Selvam P.K., Kulecovic R., Laurien E. Large eddy simulation studies on the influence of turbulent inlet conditions on the flow behavior in a mixing tee. *Nuclear engineering and design*, 2016, vol. 298, pp. 51–63.
44. Kickhofel J., Prasser H.M., Selvam P.K., Lauren E., Kulenovic R. T-junction cross-flow mixing with thermally driven density stratification. *Nuclear engineering and design*, 2016, vol. 309, pp. 23–39.
45. Lessani B., Zainali A. Numerical investigation of stably stratified turbulent channel flow under non-Boussinesq conditions. *Journal of turbulence*, 2009, vol. 10, pp. 1–25.
46. Zonta F., Onorato M., Soldati A. Turbulence and internal waves in stably stratified channel flow with temperature-dependent fluid properties. *Journal of fluid mechanics*, 2012, vol. 697 pp. 175–203.
47. Selvam P.K., Kulenovic R., Laurien E. Large eddy simulation on thermal mixing of fluids in a T-junction with conjugate heat transfer. *Nuclear engineering and design*, 2015, vol. 284, pp. 238–246.
48. Howard R.J., Serre E., Large-eddy simulation in a mixing tee junction: highorder turbulent statistics analysis. *International journal of heat and fluid flow*, 2015, vol. 51, pp. 65–77.
49. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I., Alginov R.A., Pavlov S.A. Prospects of RANS models with multiparameter effects at simulation of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface. *The 6th Proc. of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. August Harbin, China, 22–24, 2011. Vol. 2, pp. 787–791.
50. Georgiou M., Papalexandris M.V. Numerical study of turbulent flow in a rectangular T-junction. *Physics of fluids*, 2017, vol. 29, no. 6, pp. 065106-1–065106-17.
51. Kharlamov S.N., Islyamov I. Sh. Optimization of the liquid hydrocarbons pipeline transport with using a vortex effect and inductive heating of metallic additives. *The Proc. of the 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2012)*. Tomsk, Russia, September 21–24, 2012. pp. 1–6. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357803.
52. Jayaraju S., Komen E., Baglietto E. Suitability of wall-functions in large eddy simulation for thermal fatigue in a T-junction. *Nuclear engineering and design*, 2010, vol. 240, no. 10, pp. 2544–2554.
53. Tunstall R., Laurence D., Prosser R., Skillen A. Benchmarking LES with wallfunctions and RANS for fatigue problems in thermal-hydraulics systems. *Nuclear engineering and design*, 2016, vol. 308, pp. 170–181.

54. Tunstall R., Laurence D., Prosee R., Skillen A. Large eddy simulation of a T-junction with upstream elbow: the role of dean vortices in thermal fatigue. *Applied thermal engineering*, 2016, vol. 107, pp. 672–680.
55. Launder B.E., Sharma B.I. Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in heat and mass transfer*, 1974, vol. 1, no. 2, pp. 131–138.
56. Yakhot V., Orszag S.A., Thangam S., Gatski T.B., Speziale C.G. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of fluids*, 1992, ser. A, vol. 4, no. 7, pp. 1510–1520.
57. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I. Numerical modelling of a vortical investigation of heat transfer in fields of centrifugal mass forces in elements of the power equipment with a curvilinear wall. *The 5th Proc. of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. Ulsan, Korea, October, 13–15, 2010. pp. 105–109.
58. Frank Th., Lifante C., Prasser H.-M., Menter F. Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junctions using URANS and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFX. *Nuclear engineering and design*, 2010, vol. 240, pp. 2313–2328.
59. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
60. Menter F.R. Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows. *NASA TM*, 1992, vol. 10, no. 103975, pp. 1–35.
61. Speziale C.G., Sarkar S., Gatski T.B. Modeling the pressure-strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach. *Journal of fluid mechanics*, 1991, vol. 227, pp. 245–272.
62. Beneš L., Louda P., Kozel K., Keslerova R., Štigler J. Numerical simulations of flow through channels with T-junction. *Applied mathematics and computation*, 2013, vol. 219, pp. 7225–7235.
63. Craft T.J., Launder B.E., Suga K. Development and application of the cubic eddy-viscosity model of turbulence. *International journal of heat and fluid flow*, 1996, vol. 17, pp. 108–115.
64. Naji H., Mompean G., Yahyaoui O. El. Evaluation of explicit algebraic stress models using direct numerical simulations. *Journal of turbulence*, 2004, no. 5, pp. 38–63.
65. Höhne T. Scale resolved simulations of the OECD/NEA-Vattenfall T-junction benchmark. *Nuclear engineering and design*, 2014, vol. 269, pp. 149–154.
66. Feng J., Frahi T., Baglietto E. Structure-based URANS simulation of thermal mixing in T-junctions. *Nuclear engineering and design*, 2018, vol. 340, pp. 275–299.
67. Kang D.G., Na H., Lee C.Y. Detached eddy simulation of turbulent and thermal mixing in a T-junction. *Annals of nuclear energy*, 2019, vol. 124, pp. 245–256.
68. Lenci G.A. *Methodology based on local resolution of turbulent structures for effective modeling of unsteady flows*. Ph.D. Thesis. Massachusetts, 2016. 200 p.
69. Madabhushi R.K., Vanka S.P. Large-eddy simulation of turbulence-driven secondary flow in a square duct. *Physics of fluids*, 1991, ser. A, vol. 3, no. 11, pp. 2734–2745.
70. Vazquez M.S., Métails O. Large eddy simulation of the turbulent flow through a heath square duct. *Journal of fluid mechanics*, 2002, vol. 453, pp. 201–238.
71. Piquet J. *Turbulent Flows: Models and Physics*. Berlin, Springer-Verlag, 1999. 762 p.
72. Bayode Owolabi. *Characterisation of turbulent duct flows: experiments and direct numerical simulations*. Cham, Switzerland, Springer International Publ., 2019. 141 p.
73. *Theories of Turbulence*. Eds. M. Oberlack, F.H. Buss. Wien, Springer-Verlag, 2002. 373 p.
74. Sagaut P., Cambon C. *Homogeneous Turbulence Dynamics*. Cham, Switzerland, Springer International Publ., 2018. 897 p.
75. Kharlamov S.N. Heat and mass transfer in facilities with a moving piston. *Heat transfer research*, 2007, vol. 38, no. 3, pp. 233–243.
76. Hammad K.J., Ötügen M.V., Arik E.B. A PIV study of the laminar axisymmetric sudden expansion flow. *Experiments in fluids*, 1999, no. 26, pp. 266–272.

Received: 1 March 2021.

Information about the authors

Sergey N. Kharlamov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitriy S. Fatyanov, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.