

**Секция 4**  
**НОВЕЙШИЕ СИСТЕМЫ, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОДВОДНОГО ИЗУЧЕНИЯ ШЕЛЬФА АРКТИКИ И ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ**

**ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ В АНИЗОТРОПНО-НЕОДНОРОДНЫХ ОТКРЫТЫХ И ЗАМКНУТЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**С.Н. Харламов, профессор**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия*

Создание новых технологий по прогнозированию явлений, происходящих в природе и промышленных устройствах, функционирующих при длительных нагрузках и неблагоприятных климатических факторах, обусловленных иррегулярным пространственным характером движения воздушных масс, изменением состава транспортируемого рабочего тела из-за интенсивных обменных процессов теплом, импульсом, массой с внешней средой и стенками поверхности элементов оборудования требует полного анализа пространственно-временного изменения всего спектра параметров объекта исследования. С точки зрения тепломассопереноса открытая (и/или замкнутая) термодинамическая система типа “рабочее тело – поверхность функционирующего узла – внешняя среда” неразрывно связана с характером возмущений, генерируемых как мелкомасштабными конвективно-диффузионными нелинейными процессами переноса импульса, тепла и массы в рабочем теле, так и деформационными механизмами в окружающей внешней среде с: неоднородным по составу грунте; “приливным характером” вихревого атмосферного движения вязких воздушных масс; поверхностями раздела типа “земля-атмосфера” и “трубопровод-грунт”, сформированными включениями тел произвольной геометрии и фазовыми изменениями в структуре взаимодействующих веществ.

Одним из сдерживающих факторов моделирования и управления вихреобразованием в рассматриваемых термодинамических системах в условиях Крайнего Севера является отсутствие адекватных физико-математических моделей для описания реальных явлений гидрогазодинамики и сопряженного тепломассопереноса как в узлах технологического оборудования, так и в приземном атмосферном слое, учитывающих анизотропный характер поведения теплофизических, механических и неоднородных по структуре свойств системы. Часто осложненная фазовыми переходами (оттаивание, затвердевание, кристаллизация, парафинообразование, разрушение, коагуляция, термическая и механическая деградация и т.д.) на границах взаимодействия неоднородных сред в грунте, стенке, рабочем теле) форма поверхности разрыва не определена и существенно зависит от характера и интенсивности обменных процессов в узких локальных зонах системы. Это обстоятельство заставляет обращаться к формулировке процессов в системе в рамках нетривиальных и сопряженных постановок задач.

В настоящее время накоплен значительный объем знаний о механизмах переходов, обусловленных вихревой, тепловой и химической природой в сопряженных процессах. Но, в условиях выраженной анизотропной неоднородной турбулентности, доминирующей во внешней среде, прогноз деталей сложного

теплопереноса затруднен вследствие необходимости включения в анализ многопараметрической информации о локальных свойствах вихрей. В большинстве случаев эти данные ограничены или вовсе отсутствуют. Поэтому в прогнозах вихреобразования в открытых термодинамических системах чаще обращаются к полуэмпирическим методам [1]. И это, несмотря на очевидные преимущества исследований данных задач с включением информации об изменениях параметров по всему спектру масштабов процессов в рамках прямого численного интегрирования определяющих уравнений математической модели с полными уравнениями законов сохранения массы, импульса, энергии, состояния, деформаций, теплопроводности [2]. Проблемы построения решений таких задач достаточно известны (см. например, [3]).

Инженерная и исследовательская практика показывает [4], что в решении термодинамической части задачи в системе “тело-стенка-внешняя среда” хорошо зарекомендовали себя полуэмпирические модели второго порядка, основанные на допущении об изотропности свойств потока и включающие в себя уравнения переноса характеристик турбулентности. Несмотря на ряд положительных моментов, связанных с возможностью расчета сложных эффектов в развивающейся нестационарной и пульсационной структуре потоков, вносимый в модели этого уровня замыкания эмпиризм все еще не позволяет без серьезной модификации обобщить их на класс сложных вихревых течений (например, отрывных, присоединенных, учитывающих эффекты фазового перехода, тепловой деформации и т.д.). Такие процессы часто реализуются в устройствах и аппаратах, встречающихся в нефтяной и газовой промышленности, работающих при неблагоприятных климатических условиях.

Хорошо известно [1,2], что в рамках RANS-метода полное представление о характеристиках процессов, протекающих в технических устройствах с рабочими турбулизованными средами, можно получить из многомерных численных расчетов по технологичным моделям турбулентного переноса. Это дифференциальные уравнения для одноточечных корреляционных моментов второго, третьего порядка, отдельные уравнения для двухточечных моментов (модели переноса рейнольдсовых напряжений и турбулентных потоков скалярной субстанции (тепла и массы индивидуальной компоненты смеси)) [5]. Справедливости ради стоит заметить, что данные модели, относящиеся к типу феноменологических, весьма слабо апробированы в классе неизотермических гомогенных и гетерогенных систем, чувствительных к возмущениям внешних сил. Большинство публикаций, посвященных оптимизации режимов функционирования технологических устройств с учетом влияния климатических условий с привлечением RANS, DNS, LES и других подходов [1-4], можно встретить лишь в зарубежных источниках. В России и странах бывшего Союза такие исследования только начинаются и представленная работа освещает отдельные вопросы установления преимуществ и перспектив, достоинств и недостатков, точности многопараметрического моделирования анизотропной неоднородной структуры вязких смесей, чувствительных к переходам вихревой и тепловой природы. Эти сведения позволяют глубже проникнуть в суть явлений зарождения вихреобразования в арктических условиях, в частности, в течениях вязких сред с прямым и обратным переходами в трубопроводных сетях.

Полученные в рамках RANS-метода при допущениях к физической постановке рассматриваемой задачи (детально сформулированной в [6] и опущенной в силу ограниченности объема данной публикации) результаты работы

#### СЕКЦИЯ 4. НОВЕЙШИЕ СИСТЕМЫ, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОДВОДНОГО ИЗУЧЕНИЯ ШЕЛЬФА АРКТИКИ И ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

---

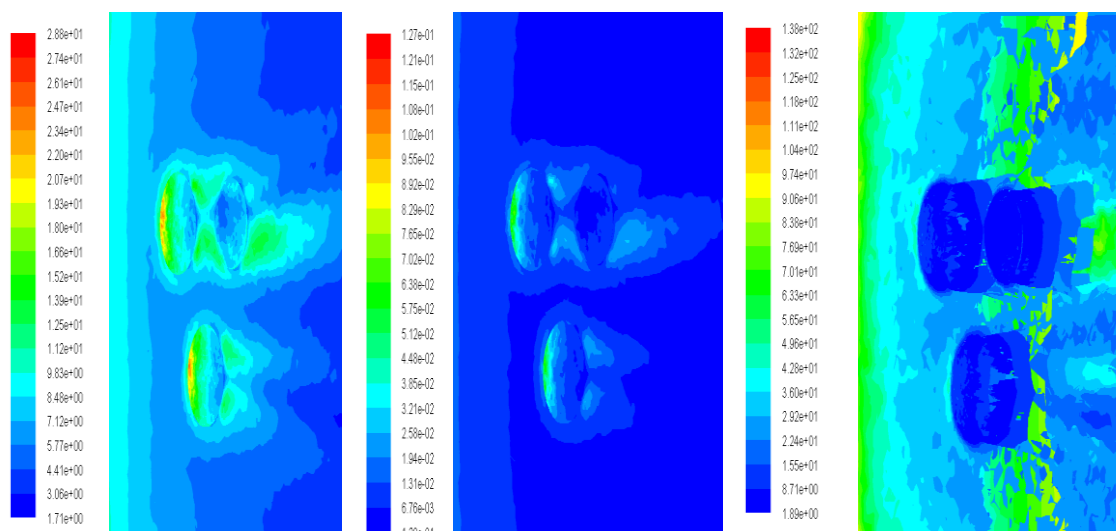
позволяют отметить новые свойства двухпараметрических динамических и термодиффузионных опорных баз с параметрами: времени диссипации динамического и скалярного пульсационного полей ( $\tau$ ,  $\tau_\xi$  ( $\xi=T$ ,  $c_i$ )); интегрального масштаба энергосодержащих вихрей ( $L$ ); скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ( $\varepsilon$ ) с эффектом разномасштабности  $\sigma$  [7]. Эти базы привлекаются для замыкания транспортных уравнений для компонентов рейнольдсовых напряжений (RS) и удельных турбулентных потоков тепла и массы (TCF) и способны дать корректное заключение об эволюции механизмов генерации вихрей в мелкомасштабных структурах с переменностью границы области движения систем в трубопроводах и внешней среде при наличии гравитационных и центробежных сил.

Эти данные позволяют разработать эффективную и универсальную численную методику расчёта неизоэтермических потоков в условиях течения вязких смесей в каналах со сложной границей поверхности, при интенсивном поступательно-вращательном движении их мольных структур. А также создать базу данных точных количественных распределений осредненных и пульсационных параметров конфигураций трубопроводных сетей, планируемых к размещению в условиях Крайнего Севера.

Представленные в работе результаты моделирования аэро-, гидро- и теплодинамических процессов в открытых термодинамических системах достаточно оригинальны, т.к. охватывают большой диапазон изменений определяющих параметров ( $Re=10^2-10^6$ ,  $Ra=10^2-10^6$ ,  $Ro=0-10$ ,  $\vartheta=1-3$ , где  $Re$ ,  $Ra$ ,  $Ro$ ,  $\vartheta$  - критерии Рейнольдса, Рэлея, Россби, температурный фактор соответственно) и в отношении научной новизны могут быть сведены к следующему. Так, в рамках алгоритма SIMPLE и обобщенного метода Л.М. Симуни на случай переменного в радиальном направлении продольного градиента давления [2] в работе построена вычислительная методика к прогнозу прямоочных и вращательных вихревых неизоэтермических течений смесей жидкостей и газов в трубопроводных системах. Проведено детальное численное моделирование вихреобразования в термодинамической системе при: переменной по длине площади поперечного сечения (внезапное расширение, сужение ТП), сложной границе поверхности фронта “грунт-атмосфера”; движении теплоносителя через конфузурно-диффузорные секции с неподвижной и вращающейся стенкой. А также выполнено обоснование использования статистических многопараметрических моделей второго порядка с транспортными уравнениями для характерных масштабов времени диссипации тепловых и динамических полей, интегрального масштаба турбулентности с эффектом разномасштабности в расчетах задач аэрогидродинамики и теплообмена для открытых термодинамических систем применительно к условиям Крайнего Севера.

Практическая значимость и обоснованность результатов расчетов, заключений и выводов определяются адекватностью используемых математических моделей и методов численного решения, что подтверждается сравнением расчетов с имеющимися экспериментами и теоретическими данными известных работ других авторов (см. например, сведения из [1–5]), а так же подтверждается расчётами с использованием коммерческих программных пакетов [8].

Ниже приведены некоторые результаты анализа эволюции динамики и теплообмена при движении вихревых неизоэтермических воздушных структур в приземном слое атмосферы со сложной границей поверхности, обусловленной спецификой размещения объектов ТЭК (рис.1–3).



**Рис.1**  
**Пространственная картина изменений поля турбулентной вязкости при взаимодействии атмосферных вихрей в приземном слое с тремя объектами ТЭК цилиндрической формы, шахматно расположенными на поверхности (вид сверху). Расчеты отвечают режиму с условиям:  $Re=5 \cdot 10^5$ ,  $Ra=10^5$ ,  $Ro=1$ ,  $\vartheta=1.5$**

**Рис.2**  
**Пространственная картина изменений кинетической энергии турбулентности. Расчеты соответствуют данным рис.1, а также структуре потока при интенсивности турбулентности  $Tu=10\%$ , и масштабе энергосодержащих вихрей  $L=0.3m$ .**

**Рис.3**  
**Пространственная картина изменений поля эффективной теплопроводности с учетом реламинаризации атмосферного приземного течения на поверхности. Расчеты аналогичны условиям, указанным для рис. 1, 2.**

Из рисунков видно, что эволюция вихревых структур в приземном слое нетривиальна в силу их чувствительности к возмущениям и особенностям пространственного изменения крупного массива локальных осредненных и пульсационных тепло- гидро- и концентрационных параметров во внешней среде. Так расчеты показывают, что наличие локальных областей ускоренного и заторможенного течений (при обтекании участков поверхности со сложной формой – “объектами” ТЭК) способно генерировать повышенные перепады поля давления. Его скачки сказываются на деталях конвективно-диффузионного переноса импульса, тепла и массы и соответственно корреляциях пульсаций поля давления с пульсациями скорости и скаляра (тепла и массы компонентов смеси). Расчетами установлено, что интенсификация механизмов перераспределения энергии между пульсациями поля давления и компонентами пульсаций тензора скоростей деформаций требует прогноза изменений в анизотропной структуре вихрей в рамках многопараметрических моделей с уравнениями для напряжений и потоков (RS-TCF). Однако успех такого подхода будет непосредственно зависеть от учета механизмов, которые обуславливают и сопровождают изменения локальных

свойств вихрей. Картины распределений эффективной вязкости (рис.1), теплопроводности (рис.2) и кинетической энергии турбулентности (рис.3) показывают, что все “тонкие” параметры задачи весьма чувствительны к аэро-, гидро- и термодинамическим эффектам течения. Эти процессы многомасштабны, существенно нелинейны, реагируют на переходы тепловой и вихревой природы. Поэтому стоит ожидать, что подходы в расчетах данных задач, ориентированные на использование заключений о постоянстве турбулентного критерия Прандтля, Шмидта, Льюиса-Семенова по высоте и ширине рабочего пространства при большом диапазоне изменений масштабов течения и тепло- и массообмена в наших условиях, вряд ли справедливы. Таким образом, результаты работы отмечают, что в данных ситуациях будут востребованы более сложные модели второго порядка с дифференциальными уравнениями для напряжений и потоков к прогнозу динамики и сопряженного тепло- и массопереноса. Они могут служить гарантией безаварийного управления и эксплуатации термодинамической системы в целом в неблагоприятных условиях Крайнего Севера.

Выполнено при частичной поддержке гранта *FP7-PEOPLE-2013-IFP, project #913974*.

#### Литература

1. Kharlamov S.N. Actual Problems of Hydrodynamics at Internal not Isothermal Flows in Fields of Mass Forces (pp. 183–232.) Chapter in monograph “Hydrodynamics: theory and model” (ISBN 979-953-307-405-3). Edited by Jinhai Zheng, Intech, Croatia, 2012. – 307p.
2. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях Томск: Изд-во ТГУ, 2001. – 447с.
3. Харламов С.Н., Serafini С., Germano R., Сильвестров С.И., Ким В.Ю. Закономерности ламинаризирующихся высокоэнгальпийных закрученных внутренних потоков в промышленных устройствах (С.198–207). В монографии «Опыт международного сотрудничества в изучении динамики природных и антропогенных комплексов Западной Сибири в контексте глобальных климатических изменений: ландшафтно-экологические и медико-биологические аспекты: сборник статей». Под ред. С.Н. Кирпотина. – Томск: Изд-во ТГУ, 2010. – 244с.
4. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Turbulent flow laminarization under conditions of spatial and heat deformations in pipelines // Proceedings of the SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, Moscow, Russia, October, 25–28, 2012, - Vol.2, – Sec. 7, 2012. (SPE 16218-PP [www.onepetro.org](http://www.onepetro.org))
5. 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 International Forum on Strategic Technology. August 22-24, 2011. Harbin, China. Proceedings Vol.2. P. 787–791. IEEE Catalog Number: CFP11786-PRT ISBN: 978-1-4577-0396-6 )
6. Харламов С.Н., Сильвестров С.И., Николаев Е.В., Зайковский В.В. О проблемах математического моделирования процессов переноса импульса, тепла и массы в углеводородных вязких средах в условиях сложного движения и

тепломассопереноса в трубопроводах // Вестник ЗСО РАЕН, – 2017. – №20. – 30с. (в печати).

7. Lai Y.G., So R.M.C. Near-wall modelling of turbulent heat fluxes// International Journal of the Heat and Mass Transfer. 1990. Vol.33. №7. P. 1429–1440.
8. Базис HYSYS. – AspenTech, Версия 2006. – 311 с.

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НАДЗЕМНОГО НЕФТЕПРОВОДА С УЧЕТОМ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИНЫ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА**

**Р.Г. Афанасьев, Е.Ю. Гвоздырев, М.Н. Коваленко**

Научный руководитель доцент В. Г. Крец

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия*

Арктика весьма богата нефтью, газом и другими полезными ископаемыми. В настоящее время здесь добывается десятая часть общемировых объемов нефти и четвертая часть – природного газа. На российском Крайнем Севере сосредоточено 80% всей арктической нефти и практически весь газ. Проведённые исследования показывают, что в Арктике находится значительная часть ещё не разведанных мировых запасов нефти.

За полярным кругом было открыто свыше 400 наземных месторождений нефти и газа. На 60 из них активно ведётся добыча, однако около четверти ещё не разработано. Более двух третей разрабатываемых месторождений находится в России, главным образом в Западной Сибири. Основной нефтегазовый район России и один из крупнейших нефтедобывающих регионов мира – Ханты-Мансийский автономный округ. Здесь добывается 57% нефти в стране.

Кроме того, на шельфе Баренцева моря разведано 11 месторождений, в том числе четыре нефтяных, три газовых, три газоконденсатных и одно нефтегазоконденсатное. Крупнейшее в мире Штокмановское месторождение содержит около 4000 млрд куб. м газа [1].

Цель работы заключается в нахождении оптимальных условий, которые обеспечат прочностные характеристики стальных трубопроводов для надежной и долговечной эксплуатации в условиях Крайнего Севера. В процессе технологического цикла изготовления и эксплуатации нефтепроводов из стали в них возможно появление нагрузок разного рода, приводящие к образованию дефектов и в будущем к разрыву [2].

Смоделируем трубопровод с дефектом: длина трещины 450 мм, глубина 11 мм, ширина трещины 10 мм. Диаметр исследуемого нефтепровода 1020 мм, толщина стенки 16 мм, рабочее давление 5 МПа, температура окружающей среды - 50°C. Нефтепровод проходит над землей, плотность нефти  $\rho = 750 \text{ кг/м}^3$ . Характеристика материала трубы: сталь СТ20 со следующими механическими характеристиками: предел прочности  $\sigma_b = 690 \text{ МПа}$ , предел текучести  $\sigma_t = 560 \text{ МПа}$  [3]. На нефтепровод, кроме рабочего давления, действуют следующие нагрузки: распределенная нагрузка от веса самой трубы и перекачиваемого продукта –  $q = q_t + q_{п.}$

$$q_t = n_{св} \cdot \gamma_m \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_H^2 - D_{вн}^2) = 1,1 \cdot 78500 \cdot \frac{3,14}{4} \cdot (1,02^2 - 0,988^2) = 4355,6 \text{ Н/м}^2,$$

где  $n_{св} = 1,1$  – коэффициент надежности по нагрузкам при расчете на продольную устойчивость и устойчивость положения;