

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИКА НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ И НЕФТЕГАЗОХРАНИЛИЩ

Подсекция 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ НЕФТИ И ГАЗА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В УЗЛАХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

С.Н. Харламов¹, Ю.И. Усенко², Ю.А. Ковалев²

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

² *Инженерно-технический центр, г. Томск, Россия*

Аннотация. Работа посвящена обсуждению современных проблем моделирования классов внутренних задач динамики вязких сред, включающих сильнонелинейные эффекты, а также демонстрации тенденций, перспектив и достижений отечественного и зарубежного опыта в прогнозе газодинамических и термодинамических процессов в элементах энергетических устройств и секциях трубопроводных систем с произвольной кривизной поверхности стенки.

Введение. Во второй половине XX в. новое развитие приобрели комплексные подходы к детальному физико-математическому и численному моделированию процессов, сопровождающих работу энергетических устройств, систем трубопроводного транспорта природного сырья до потребителя, осложненных нестационарностью, неизотермичностью, турбулентностью, переменностью теплофизических свойств рабочего тела, химическими реакциями и тепломассопереносом с внешней средой в связи с совершенствованием опытного оборудования и внедрением высокопроизводительных средств вычислительной техники. В это же время большой прогресс получили исследования гидрогазодинамической эволюции термодинамических систем, геологической истории, рационального использования природных ресурсов, обнаружения и оперативного предотвращения катастрофических взаимодействий внешней среды с человеком на основе вынесенного за пределы земной атмосферы астрономического и технологического оборудования. В таких условиях реализация любых программ по развитию технологий, проектирования оборудования для нефтегазовой и химико-технологической, теплоэнергетической и ракетно-космической отраслей промышленности сопряжена с решением проблем создания безаварийных и надежных систем доставки сырья широкого назначения. К ним, прежде всего, следует отнести трубопроводные системы, энергетические устройства, включающие узлы и соединения со сложной конфигурацией поверхности стенки, работающие в режимах интенсивных внешних воздействий и быстропротекающих внутренних тепловых и динамических процессов. Учитывая рост технических возможностей в настоящее время в России и за рубежом активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования по комплексному моделированию внутренних процессов в смесях вязких сред с высокоскоростным движением рабочего тела по узлам трубопровода, включающего подвижную границу. В таких системах - "камерах" - часто формируются повышенные температуры и давления, которые вызывают нежелательные эффекты преобразования внутренней энергии потока в кинетическую энергию подвижных границ, тепловую энергию в энергию химических связей и слабо поддаются управлению.

Перспективы исследований трубопроводных систем. В данной части работы анализируются тенденции, перспективы и достижения в комплексном физико-математическом и численном моделировании, экспериментальном анализе процессов гидро- и газодинамики, сопряженного тепло- и массообмена при высокоскоростных движениях химических активных гомогенных и гетерогенных вязких сред в трубопроводных системах со скачками площади поперечного сечения, узлами и соединениями T-, U-, F-, S- образной формы с подвижной границей, инициирующие высоконестационарные течения и быстропротекающие процессы у поверхности трубопровода. Отмечаются проблемы использования современных теплогазодинамических моделей с дифференциальными уравнениями второго порядка для компонент полного тензора напряжений Рейнольдса и удельных потоков тепла и массы в сложных течениях. А также уясняются возможности RANS - подхода в прогнозе быстрых явлений и механизмов изменений структуры потока на основе глубокого проникновения в суть взаимосвязанных мелкомасштабных процессов переноса, сопровождающих нестационарный режим транспортировки продуктов по секциям трубопровода сложной формы. Особое внимание при построении моделей уделено прогнозу эффектов, сопровождающих процессы интенсивного теплового и динамического воздействия потока смесей газов на стенку трубопровода в окрестности ввода энергии; неравновесных и равновесных химических реакций, например, диссоциации, а при повышенном тепловом фоне и ионизации в рабочей среде; термической деградации поверхности узла или соединения указанной выше формы; засорения рабочего газа парами и/или твердыми частицами металла и т.д.

Хорошо известно [1-5], что на состояние рабочей среды в трубопроводах в условиях возможных больших перепадов давления оказывает влияние не только динамическая эволюция смеси, наличие слабых и сильных разрывов, но и внутрифазные и межфазные процессы переноса тепла, массы, химические превращения и турбулентность. С учётом отмеченных особенностей в работе обсуждается и строится математическая модель к детальному прогнозу локальных процессов переноса с учетом взаимовлияния эффектов турбулентности и химических реакций как при “глубоко” равновесных, так и неравновесных режимах, а также наличия выраженной деформации поверхности стенки. Отмечаются проблемы численного интегрирования определяющих уравнений в химически реагирующих течениях с замыканиями второго порядка для турбулентных потоков импульса, тепла и массы с опорными двухпараметрическими базами для динамической (k-L), тепловой ($\overline{h'^2} - \varepsilon_{h'}$) и диффузионных ($\overline{\xi'^2} - \varepsilon_{\xi'}$) частей задачи [2]. Здесь представлено: k – кинетическая энергия турбулентности, L- интегральный масштаб энергосодержащих вихрей, $\overline{h'^2}$ - автокорреляция пульсаций энтальпии, $\varepsilon_{h'}$ - скорость диссипации пульсаций энтальпии, $\overline{\xi'^2}$ - интенсивность пульсаций консервативной скалярной величины (коэффициент смеси), $\varepsilon_{\xi'}$ - скорость ее диссипации, черта над знаком функции – временное осреднение по Рейнольдсу. Отдельные результаты этого перспективного подхода полно отмечены в [1 - 4].

Отдельные результаты и их обсуждение. Представленные результаты по высокотемпературному движению теплоносителя по контуру ЦПС позволяют утверждать о существенном влиянии геометрии на структуру течения. Срыв потока в боковой патрубков заметно интенсифицирует уровень теплогидродинамических пульсаций и перераспределяет кинетическую энергию турбулентности потока, вихри большой энергии в направлении одной их стенок. Установлено, что процесс перераспределения энергии сопряжен с формированием анизотропной турбулентной структуры. И в этом огромную роль играют механизмы баланса турбулентного переноса импульса: корреляция пульсаций поля давления и скорости. Расчетами установлено наличие новых свойств двухпараметрических моделей, важных для формулировки замкнутой формы неизвестных членов высшего порядка таких, как турбулентная диффузия, диссипация и перераспределение в уравнениях рейнольдсовых напряжений и удельных турбулентных потоков. Показаны картины пространственных распределений параметров локальной структуры течения в секциях трубопровода (изменения пульсационных полей скорости, температуры и состава, а также их корреляций) в произвольные моменты времени. Эти сведения весьма ценны и полезны для практических приложений в расчетах сложных течений. Для практики весьма ценно, что из – за многопараметричности и многомерности рассматриваемых явлений в трубопроводе модели турбулентности такого уровня, как “Reynolds stresses- Scalar fluxes”, требуют предварительной настройки на рассматриваемый режим описания быстропротекающего движения с включением надежных данных об изменении “тонкой” структуры инертного и химически реагирующего потока. Настройка включает коррекцию численной процедуры к конкретным условиям, как по кинематическим аспектам явления, так и по тепловым характеристикам. Заметим, что при таком подходе надежность вычислительной технологии подтверждается результатами многочисленных сопоставлений расчетов с опытными данными по “реперным” процессам, так и реальным ситуациям течений в трубопроводе с узлами и соединениями рассматриваемой формы.

В части описания интегральных параметров в быстропротекающих явлениях установлено следующее. Прогноз диссипативных потерь энергии в высокоскоростном течении химически реагирующих сред в трубопроводе вполне корректен по квазистационарным критериальным зависимостям. Так, для определения коэффициентов трения и теплоотдачи в практику рекомендуются связи:

$$\zeta = 0,131 \text{Re}^{-0,18} \left(\frac{\Theta}{T_w} \right)^{0,215} \left(\frac{\tilde{c}_{p \text{ eff}}}{c_p} \right)^{-0,35}; \quad (1)$$

$$\text{Nu} = 0,0162 \text{Re}^{-0,82} \text{Pr}^{0,4} \left(\frac{\Theta}{T_w} \right)^{0,215} \left(\frac{\tilde{c}_{p \text{ eff}}}{c_p} \right)^{0,45}; \quad (2)$$

$$\text{Re} = D \rho \bar{u} / \mu(\bar{T}), \quad \text{Pr} = c_p \mu(\bar{T}) / \lambda(\bar{T}), \quad \Theta = \bar{T} + r_w \bar{u}^2 / (2c_p), \quad r_w = \sqrt[3]{\text{Pr}}; \quad (3)$$

$$\tau_w = (\zeta/8) \bar{\rho} \bar{u}^2, \quad q_w = \text{Nu} (\Theta - T_w) \lambda(\bar{T}) / D. \quad (4)$$

Здесь ζ - коэффициент сопротивления трения; Nu, Pr - числа Нуссельта и Прандтля; Θ - температура торможения потока; r_w - коэффициент восстановления; $\bar{\rho}, \bar{T}$ - средняя по сечению канала плотность газа и среднemasсовая температура потока; T_w - температура внутренней поверхности трубопровода.

Кроме того, опыт исследований равновесно-диссоциирующих внутренних режимов течений вязких сред показывает, что в их детальном математическом моделировании вполне достаточны уравнения в форме связей Гульдберга-Вааге, Саха, сформулированных для учета пульсаций температуры и состава (детали подхода подробно изложены, например, в [2]). Заметим, что такой способ позволяет проанализировать ряд важных фундаментальных эффектов, сопровождающих сдвиговые течения: взаимодействие химических превращений и турбулентности; влияние реакций на интенсивность теплопереноса к идеально каталитической неизотермической стенке. Для данных условий течения также установлено, что уровень пульсаций температуры

в рекомбинирующем у стенок трубопровода газе довольно высок и способен значительно менять локальный состав смеси. Перестройка поля температуры за счет теплового эффекта химической реакции сказывается на кинематических характеристиках течения, а также на величине энергии турбулентных пульсаций. Последняя существенно увеличивается в реагирующем потоке. Исследование показывает, что учет химических превращений оказывает влияние на интегральные характеристики процесса.

Таким образом, предложенные в работе подходы, модели и методы прогноза сложных течений в ТП с секциями сложной формы стенки неизменно демонстрируют высокую точность, весьма корректны для систем со специфической реологией и могут быть полезны при выполнении заданий, связанных с организацией эффективного управления транспортировкой продуктов в режимах быстропротекающих процессов.

Литература

1. Бубенчиков А.М., Гольдин В.Д., Панько С.В., Старченко А.В., Харламов С.Н. Исследование турбулентных вихревых течений газа и аэродисперсных смесей в камерах и свободном пространстве // Третий Сибирский конгресс по прикладной и индустриальной математике (ИНПРИМ'98). Ч.2. Сек. Механика. 1998. -Новосибирск, 1998. - С. 89 – 90.
2. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. - Томск: Изд-во ТГУ, 2001. -440 с.
3. Kharlamov S.N. Mathematical Modelling of Thermo- and Hydrodynamical Processes in Pipelines (academic book). Rome, Italy: Publ. House "Ionta", 2010. 263p.
4. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Modelling of Complex Shear Flow Structure in Pipelines // International Journal of Engineering, Science and Innovative Technology, 2014. – Vol. 3, - Iss. 6. –С. 500-509.
5. Харламов С.Н. Выработка решений по защите теплообменников от гидравлического удара. Материалы итогового отчета в ООО "Томский инженерно-технический центр". Томск. 2012 (Хд № 1-526/12у от 01.08.2012г.).

ЯВЛЕНИЕ РОЛЛОВЕРА ДЛЯ ХРАНИЛИЩ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Р.Х. Агеев

Научный руководитель профессор С.Н. Харламов

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет, г. Томск, Россия.

Система хранения сжиженного природного газа (СПГ) включает в себя следующие элементы: стационарные резервуары; оборудование, предназначенное для заполнения резервуаров от технологических линий сжижения газа; оборудования для отгрузки (стендеры); оборудование, обеспечивающее безопасность хранения СПГ. При этом стоимость резервуарного парка составляет до 50 % стоимости всего комплекса. Соответственно, к этим сооружениям должны предъявляться особые требования как при строительстве, так и при эксплуатации [1].

Несмотря на малую аварийность объектов хранения СПГ, всё же аварии происходили и при строительстве, и при эксплуатации. Одной из технологических проблем при эксплуатации является стратификация жидкости в хранилище, и затем возможное резкое перемешивание слоев и интенсивное парообразование, превышающее стационарное испарение, что может привести к повреждению резервуара [2].

В зарубежной литературе данный процесс получил название «ролlover» (rollover - «переворачивание») Физическая модель процесса отличается тем, что при загрузке резервуара свойства продукта, уже хранящегося в изотермическом резервуаре (ИР), отличаются от свойств СПГ, закачиваемого в резервуар. В ИР, оборудованных системой нижнего налива, СПГ, имеющий большую плотность, образует нижний слой. СПГ, имеющий меньшую плотность, формирует верхний слой, который располагается над поверхностью нижнего, не перемешиваясь с ним. Перегреваясь относительно температуры насыщения за счет внешнего теплопритока через днище и стенки, продукт в нижнем слое при этом не имеет возможности компенсировать теплоприток за счет испарения, т.к. поверхность теплообмена закрыта нижним слоем. Однако имеют место процессы тепло- и массообмена двух слоев между собой и верхнего слоя с парогазовой фазой. В конечном итоге, в определенный момент времени после загрузки и образования стратификации, за счет описанных выше процессов плотности слоев выравниваются с последующей резкой интенсификацией процессов испарения продукта (ролlover). В этом случае важно знать время наступления «ролloverа» и возможное парообразование, чтобы предотвратить повреждение хранилища.

Поэтому изучение явления ролloverа является актуальной, особенно для России, т.к. на о. Сахалин уже действует завод по производству СПГ и рассматриваются варианты строительства аналогичных заводов на Штокмановском месторождении и на п-ве Ямал, а нормативно-техническая база для объектов СПГ практически отсутствует.

Причины ролloverа:

- Когда есть разница температур жидкости.
- Если СПГ хранится в течение длительного времени без циркуляции.
- Если две различные партии СПГ хранятся в одном резервуаре

Эффект от ролloverа:

- Увеличение скорости испарения до 10 раз, в отличии от нормального состояния
- Повышение давления бака
- Подъем предохранительного клапана резервуара