

С Е К Ц И Я 17

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЕГАЗОВОМ ДЕЛЕ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ НЕФТИ И ГАЗА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ РЕОЛОГИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ВЯЗКИХ СРЕД: ИДЕИ, РЕЗУЛЬТАТЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОГНОЗА ПРОЦЕССОВ

Харламов С.Н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Резюме. В настоящей работе представлен критический анализ проблем, результатов и перспектив исследований течений сложных по структуре/реологии вязких сред в трубопроводных системах (узлах оборудования нефтегазовой, химико-технологической и тепло-энергетической промышленности), испытывающих на себе влияние неизотермичности, нестационарности, переменности тепло- и реофизических свойств, внешних полей от действия инерционных и гравитационных сил, особенностей формы поперечного сечения проточной части. Особое внимание уделяется: технологиям моделирования углеводородов (тяжелых нефтей, масел) при их транспортировке на участках труб/каналов с интенсивным тепломассообменом; определению мер повышения энергоэффективности и стабильности функционирования оборудования, изучению опыта анализа проблем коррозии энергонапряженных элементов, а также их очистки от загрязнений.

Введение. В настоящее время наметился значительный прогресс в исследованиях характеристик течения и тепломассообмена аномально вязких гомогенных и гетерогенных потоков, нетривиально движущихся по ограниченным областям трубопроводных систем с геометрическими особенностями их соединений, в режимах, определяемых их практическим назначением. Деформационные, эрозионно-коррозионные эффекты, обусловленные химическими, структурными, тепло-, гидро-, газодинамическими и реологическими изменениями состава и режима движения теплоносителя отличаются спецификой миграции частиц углеводородной смеси по трубопроводу и особенностями их взаимодействием с идеально каталитической стенкой [3].

Цель данной работы заключается в: *обобщении* известного опыта изучения указанных сдвиговых потоков; *разработке* комплексной физико-математической модели прогноза гидрогазодинамики и тепломассообмена в гомогенных и гетерогенных смесях в условиях деградации внутренней поверхности стенок технологического оборудования; *выдаче* рекомендаций о прогнозе процессов переноса массы, импульса и энергии при транспорте водонефтяного сырья с выраженной кольцевой и аномально вязкой структурой ядра.

Детали моделирования и результаты. Хорошо известно [2 - 5], что популярными кодами в решении указанных проблем выступают коммерческие пакеты на основе CFD методов с лагранжево-эйлеровым подходом описания движения твердых частиц в гетерогенной смеси. Опыт показывает [2, 5], что при воздействии внешних сил, учете эрозионно-коррозионных эффектов данные технологии особенно эффективны при малых концентрациях частиц. Многие исследователи предпочитают моделировать течение в элементах ТП в рамках гомогенных моделей однофазных систем, учитывая то, что именно при течении этих сред в соединениях ТП накоплен большой объем экспериментальных данных, позволяющих выполнять детальную верификацию предлагаемых моделей и валидацию результатов расчета, полученных на их основе [4]. Комплексное моделирование неизотермического сложного сдвигового течения углеводородной ньютоновской/неньютоновской смеси (нефть/вода), засоряющейся частицами эрозионно-коррозионного разрушения поверхности ТП с соединением Т-/конфузорно-/диффузорной формы крайне затруднительно без отдельных физических упрощений [7]. Так, например, следует учитывать, что транспорт сырой нефти включает динамику состава с компонентами (углерод, водород, сера, азот, кислород) и их соединениями, относительное содержание которых сильно влияет на рео-, теплофизические, химические и механические свойства термодинамической системы “стенка ТП - рабочая гомогенная/гетерогенная смесь”. Допускается, что наличие воды и солей в углеводородном продукте представляет основную причину процесса коррозии, при этом диапазон температурных напоров является относительно небольшим для устойчивого существования водяного пара. Кроме того, считается, что при турбулентном течении коррозия обусловлена конвективно-диффузионным переносом компонент водонефтяной смеси к стенкам ТП с соединением. Массоперенос и интенсивность коррозии взаимосвязаны и определяются деталями моделирования процессов молярного и молекулярного процессов переноса импульса, массы, теплоты в рамках моделей течения однофазной/двухфазной смеси.

Гидродинамический блок задачи (однофазное/двухфазное ньютоновское/неньютоновское течение водонефтяной смеси с твердыми частицами примеси) включает технологию математического моделирования и численного интегрирования нестационарных уравнений Навье-Стокса для слабосжимаемых сред, представляющих законы сохранения импульса и массы в осредненной форме, используемой при обращении к RANS-методу [4,7]. Замыкание неизвестных этих уравнений проводится в рамках моделей: реологии – Гершеля-Балкли/степенной

**СЕКЦИЯ 17. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И
ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ТЕХНИКЕ И
ТЕХНОЛОГИЯХ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЕГАЗОВОМ ДЕЛЕ.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ НЕФТИ И ГАЗА.**

жидкости; турбулентной вязкости с параметрами: кинетическая энергия турбулентности (k), интегральный масштаб энергосодержащих вихрей (L) [5-6], которая успешно зарекомендовала себя на классе расчетов сложных внутренних течений с тепломассообменом в инертных и химически реагирующих средах [6]. Библиографический анализ публикаций показывает (см., например, [2-7]), что большинство исследователей моделирование процессов переноса при деградации стенок ТП проводят в рамках моделей типа $k-\omega/\epsilon$ с пристеночными функциями. Это не вполне оправдано, особенно в условиях практического интереса к исследованию неоднородной турбулентности в зонах низкорейнольдсового течения. Отмечается, что прогноз процессов в указанных выше условиях течения смеси следует проводить по моделям с расчетами непосредственно до стенок ТП, где большей устойчивостью к возмущениям, идущим со стенок, а также учете коррозии и деструкции их поверхностей, обладает kL – модель турбулентности Г.С. Глушко – О.Ф. Васильева [4,7].

Моделирование скалярной субстанции. Тепловая часть задачи включает уравнение энергии для смеси (для гомогенной среды в энтальпийной форме Фурье-Кирхгофа). Распределение локальных значений относительных массовых концентраций водонефтяной смеси выполняется по уравнению диффузии, причем допускается, что в молекулярных процессах переноса тепла и массы имеется полная аналогия, отсутствуют скрещивающиеся эффекты от механизмов термодиффузии, диффузионной теплопроводности. В вопросах замыкания осредненных уравнений допускается, что при определении коэффициентов молярного переноса (температуропроводности, диффузионности) турбулентные аналоги критериев Прандтля и Шмидта (Pr_t, Sc_t) – есть функции учета особенностей процессов переноса в рамках структуры турбулентного пограничного теплового и диффузионного слоя [3,4-7].

Коррозионная модель. Известно, что сорта сырой нефти содержат нежелательную примесь – серу, по количеству которой сырье классифицируют как мало- или высокосернистое. Т.к. тяжелые сорта нефти высокосернисты, то в заданных условиях краевой задачи, рассчитанные по определяющим уравнениям (движения, энергии, диффузии и неразрывности), полученные поля индивидуальных компонент смеси позволяют обеспечить контроль за образованием сероводорода (H_2S), который сильно влияет на процесс коррозии материала стенки (аналогично эффектам от влияния кислородной компоненты, O_2 в составе водной примеси, H_2O). Коррозионную диффузионную модель составляют следующие реакции [1]:



Таким образом, численное интегрирование уравнений диффузии массы индивидуальных компонент позволяет получить концентрацию сероводорода/кислорода, которая сильно влияет на молекулярно-диффузионный процесс тепломассопереноса в рамках пограничного слоя. Тогда следуя [9], можно получить коэффициент

$$\text{массопереноса } (k_m) \text{ для компонент } (H_2S, O_2) \text{ по связи:} \quad k_m = \frac{D^L c_i}{\Delta y c_b} \quad (4)$$

и определить удельные потоки:

$$j_{O_2} = k_m (c_{b_{O_2}} - c_{w_{O_2}}); \quad j_{Fe} = 2k_m c_{b_{O_2}} \quad (5)$$

В (4), (5) принято, что c_b, c_w – среднемассовые значения концентраций O_2 и концентрации O_2 на стенке соответственно. По известным значениям коэффициентов массопереноса k_m может быть вычислена величина скорости коррозии (мм/год) в виде:

$$\dot{R}_{H_2S} = \frac{k_{mH_2S} c_{bH_2S} M_{Fe}}{2\rho_{Fe}} \quad (6)$$

Также, используя молярную массу железа (M_{Fe}) и ее плотность (ρ_{Fe}) можно определить скорость коррозии \dot{R}_{O_2} . Заметим, что для относительно простых геометрических и теплодинамических конфигураций тепломассопереноса в рассматриваемых ТП представления об аппроксимационных связях для определяемых критериев подобия (например, Шервуда, Нуссельта) в виде $Sh=f_1(Re, Sc)$, $Nu=f_2(Re, Pr)$ могут служить оценками точности решения задачи о скорости коррозии.

Заключение. Библиографический анализ и результаты исследований гидродинамики и тепломассообмена в ТП с соединениями Т-/конфузорно-/диффузорно образной формы при: - турбулентном высокоинтенсивном течении ($Re=5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5$, $Tu=1-10\%$, $Sc=1 - 500$, $Le=0,95-0,98$) гомогенных и гетерогенных углеводородных капельных смесей с примесью твердых частиц; - влиянии внешних сил (инерционных/гравитационных); - переменности тепло- и реофизических свойств; - коррозионной деградации стенок *показывают свою высокую зависимость* от деталей описания молярных процессов переноса, а также необходимостью и надежностью их расчета вплоть до стенок без приближений типа пристеночных функций. Предсказания интенсивности рециркуляционных течений в местах соединений, тепло- и массопереноса осложнены особенностями пространственных изменений в локальной теплодинамической и концентрационной структуре потока, коррозионными эффектами, особенно, на участках поворота течения в магистрали и зонах присоединения. Установлено, что расчеты в рамках 2D моделей не вполне корректны при прогнозах интенсивности тепломассопереноса в соединениях. Кроме того, отдельные результаты свидетельствуют, что в указанных конфигурациях выражены вторичные течения, прогноз которых не может быть представлен в рамках моделей турбулентности с изотропными коэффициентами вязкости (температуропроводности/диффузионности). Этот класс течений требует привлечения более полных моделей для

напряжений и турбулентных скалярных потоков с транспортными уравнениями второго порядка. Показано, что модель динамики частиц сероводорода (кислорода) по пространству узла соединения позволяет выявить локальные области с интенсивным массопереносом и определить степень коррозии внутренней поверхности стенки ТП. Включение сведений о коэффициенте массо- и теплопереноса позволяет расширить приложение модели расчета скорости коррозии. Кроме того, отмечается, что экстремальные значения коррозии определяются процессами роста в пристеночной области значений: кинетической энергии турбулентности, масштаба энергосодержащих вихрей и интенсивности вторичных течений. Последнее представляет большой практический интерес и составляет предмет перспективных исследований.

Литература

1. Berger F.P., Hau K. // International Journal Heat and Mass Transfer. - 1977. - V.20. –P. 1185- 1194.
2. Bergstrom D.S., Bender T., Adamopoulos G., Postlethwaite J. // Canadian Journal of Chemical Engineering. – 1998. -V. 76. - N.8. –P. 728-737.
3. Chang S.M., Humphrey J.A.C., Modavi A. // Physicochemical hydrodynamics. – 1983. - V. 4. - N.3. -P. 243-269.
4. Nestic S. Computational of localized erosion-corrosion in disturbed two-phase flow. PhD Thesis, University of Saskatchewan, 1991. - 230p.
5. Poulson B., Robinson R. // International Journal Heat and Mass Transfer. - 1988. -V.31. -N. 6. -P. 1289-1297.
6. Альгинов Р.А., Харламов С.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № ОВЗ. – С. 483–495.
7. Харламов С.Н., Джангхорбани М. // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. -2020. -Т. 331. –N. 7. –P.131–149.
8. Харламов С.Н., Фатьянов Д.С. // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2020. - Т. 331. N.8. –С. 53-67.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ В СКВАЖИНАХ БЕЗ ОТБОРА КЕРНА Абдуллаев Р.А.

Научный руководитель - профессор В.Б. Белозеров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Фильтрационно-емкостные свойства являются важнейшими входными данными в процессах статического и динамического моделирования. В то время как пористость может быть относительно легко получена как напрямую (в ходе лабораторных измерений образцов керна), так и косвенно (на основе измерений физических свойств пласта), оценка проницаемости все еще ограничена исследованиями кернового материала или гидродинамическими испытаниями скважин с соответствующими замерами, так или иначе зависящими от калибровки на лабораторных данных. Существует также альтернативный способ оценки проницаемости по пористости на основе статистической зависимости, полученной в ходе исследований керна. Недостаток этого метода заключается в том, что корреляция измеренных параметров не всегда отличается необходимой точностью, так как выборка кернового материала может оказаться непредставительной из-за низкой степени охвата нефтеперспективной площади данными бурения [2].

Учитывая, что точное определение проницаемости играет решающую роль в эффективном извлечении углеводородов, оптимизируя процесс размещения скважин и выбор интервалов перфорации, создание и промышленное внедрение алгоритма, способного максимально точно и быстро вычислить ее значение при минимальном объеме входных данных, является одной из приоритетных задач в моделировании. Решением проблемы, связанной с «заполнением» модели недр корректными значениями проницаемости, может быть ее расчет на основе геофизических исследований скважин (ГИС), проводимых повсеместно и имеющих высокую степень информативности продуктивного коллектора как по разрезу, так и по площади. Этому способствует и появление устройств с высокой вычислительной мощностью, позволяющих проводить с помощью алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта быстрый и точный анализ больших объемов данных по сравнению с традиционными или статистическими техниками [3].

Целью данной работы является создание алгоритма, позволяющего предсказывать значения проницаемости на основе данных ГИС в скважинах, не освещенных керновыми данными. Оптимальный вариант алгоритма будет найден путем сравнения точности различных моделей оценки проницаемости, построенных на основе линейной и логистической регрессий, ансамбля деревьев решений, а также нейронных сетей.

Работу алгоритма машинного обучения можно описать следующим образом: существуют так называемые обучающая, валидационная и тестовая выборки данных, каждая из которых включает в себя объекты, описываемые некоторым набором признаков. Конечная цель алгоритма машинного обучения – восстановить математическую зависимость между представленными парами объект-признак таким образом, чтобы в дальнейшем ее можно было распространить на объекты тестовой выборки для нахождения неизвестных признаков. Валидационная выборка используется для оценки точности полученной зависимости.

Перед построением модели любого типа необходимо обработать и проанализировать входные данные. В данном случае предобработка представляла собой объединение данных ГИС участка Восточно-Мессояхского месторождения в единую таблицу (датафрейм) с последующим отбором присутствовавших во всех скважинах методов. Работа осуществлялась с объектом ПК_{1.3}. Данные были разделены на две группы: для обучения модели использовались значения ГИС скважин 58, 112, 121 и 123, а для оценки точности – данные скважины 85.

Следующим шагом необходимо произвести увязку керновых данных с данными ГИС в интересующем нас интервале. Задача была осложнена тем, что запись геофизических исследований производилась с шагом 0,2 метра, а