

**СОЛОВЬЕВ С. Е., КУНЦЕВ В. Е.
СПОСОБ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ АЛГОРИТМА ОБРАЗОВАНИЯ
ПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА СТЕНКАХ НЕФТЕПРОВОДА
В ПРОЦЕССЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ**

УДК 622.276.72, ГРНТИ 28.17.19

Способ численного решения алгоритма образования парафиновых отложений на стенках нефтепровода в процессе транспортировки

С. Е. Соловьев¹, В. Е. Кунцев²

¹ООО «Консалт-Информ», г. Ухта;

² Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта

В статье представлена модель образования парафиновых отложений в нефтяных трубопроводах с анализом теплопередачи и переноса массы. Рассмотрены численные методы решения связанной системы уравнений конвекции-диффузии-реакции.

Представлена реализация на C++ с оптимизированными библиотеками для расчётов эволюции толщины отложений. Приведены примеры расчётов температурных и концентрационных полей, сравнение производительности языков программирования и визуализация результатов с интерактивными графиками.

Ключевые слова:
асфальтосмолопарафиновые отложения, воскообразование, теплопередача, перенос массы, численные методы, C++, число Рейнольдса, число Шервуда

A method for numerically solving the algorithm for the formation of paraffin deposits on the walls of an oil pipeline during transportation

S. E. Solovev¹, V. E. Kuntsev²

¹LLC "Consult-Inform", Ukhta;

² Ukhta State Technical University, Ukhta

The article presents a model for the formation of paraffin deposits in oil pipelines, with an analysis of heat transfer and mass transfer. Numerical methods for solving the coupled convection-diffusion-reaction system of equations are considered. A C++ implementation with optimized libraries for calculating the evolution of deposit thickness is presented. Examples of calculating temperature and concentration fields, comparing the performance of programming languages, and visualizing the results with interactive graphs are provided.

Keywords: asphalt-resin-paraffin deposits, wax formation, heat transfer, mass transfer, numerical methods, C++, Reynolds number, Sherwood number

Введение

Проблематика парафиновых отложений (ПО) представляет собой одну из наиболее актуальных и комплексных областей исследований в российской нефтяной промышленности, особенно с учетом географических особенностей северных регионов. ПО представляют существенную проблему для обеспечения бесперебойного функционирования магистральных нефтепроводов. Формирование отложений парафинов и асфальтенов на внутренних стенках трубопроводов приводит к сужению эффективного сечения, увеличению гидравлического сопротивления, снижению производительности системы транспорта и в критических случаях к полной блокировке потока. Экономические потери от образования ПО в российской нефтедобывающей отрасли оцениваются как значительные, связанные с необходимостью проведения интенсивных профилактических и ремонтных работ.

Отложение парафина [1] или осаждение твердых частиц парафина на трубопроводах и оборудовании является обширной проблемой, с которой сталкиваются при добыче и транспортировке нефти. Протекая по подводным трубопроводам, нефть и конденсат подвергаются охлаждению. Если температура перенасыщенной смеси сырой нефти падает ниже предела растворимости парафина, известного как температура появления парафина (WAT), твердый парафин начинает появляться в растворе. При температуре ниже WAT и радиальном тепловом потоке от жидкости к окружающей среде парафин будет осаждаться, прилипать к внутренней стенке трубы и постепенно накапливаться [2]. Результатом является нежелательный слой парафина на внутренней стенке трубы, вызывающий ограничения потока, снижение добычи и необходимость в очистке.

В связи с этим разработка надежных инструментов прогнозирования и отслеживания процессов отложения становится критически важной задачей для промышленности. В рамках данной работы поставлена цель разработать инструмент для прогнозирования образования парафиновых отложений в нефтепроводе на основе математической модели. Инструмент для прогнозирования образований уменьшит затраты на обслуживание оборудования и даст возможность своевременно проводить очистку магистральных нефтепроводов без последствий.

Теоретический анализ

Обзор существующих математических моделей и программных комплексов для прогнозирования образования ПО показал преимущество описываемой модели над альтернативными подходами. Современные коммерческие решения, такие как OLGA Wax от Schlumberger, реализуют модели на основе тепловой аналогии и критерия Шервуда, демонстрируя погрешность порядка 6% при оптимальных параметрах. DeroWax от Calsep представляет собой композиционный многофазный симулятор с термодинамической моделью преципитации на основе уравнений состояния Коутиньо. TUWAX, разработанный университетом Талсы, интегрирует модели Венкатесана и

Сингха, предполагая молекулярную диффузию как доминирующий механизм отложения.

Математическая модель [3], разработанная исследовательской группой ученых (Singh, Lee, Fogler), функционирует на фундаментальных принципах транспортного явления. Ключевая особенность заключается в том, что модель предсказывает скорости отложения благодаря решению основных уравнений баланса энергии и массы в условиях молекулярной диффузии, учитывая пространственное распределение фракции парафина в отложениях. Критически важным преимуществом является то, что математическая модель содержит нулевые параметры настройки для верхних и нижних пределов толщины отложения, что исключает необходимость эмпирической подгонки параметров. Модель проверена на более чем 50 экспериментах во время фильтрации из различных лабораторных комплексов во всем мире.

Модель RRR (Rygg-Rydahl-Rønningsen), разработанная норвежскими исследователями, интегрирует механизмы молекулярной диффузии и сдвиговой дисперсии, предсказывая отложение парафина в скважинах и трубопроводах с учетом изменений гидравлического диаметра. Однако модель требует значительных вычислительных ресурсов и демонстрирует ограничения при применении в ламинарном режиме потока. Модель Matzain представляет собой полуэмпирическую кинетическую модель, калибруемую на экспериментальных данных, полученных на образцах нефти South Pelto, что снижает универсальность применения на различные типы углеводородов.



Рисунок 1. Сравнение прогнозов толщины отложений парафина, полученных с помощью моделей Мичигана, Мацайна и RRR, с экспериментальными данными с течением времени

Сравнительный анализ показал, что выбранная модель демонстрирует лучшие предсказательные способности с абсолютным отклонением около 1% для толщины отложений и 2.8% для фракции парафина в отложениях, что является наименьшим показателем среди анализируемых моделей. Физическое основание подхода предоставляет универсальность применения без необходимости переопределения коэффициентов для каждого нового углеводорода.

Методика

Рассчитываемая модель описывает молекулярную диффузию как последовательность четырех основных шагов.

1. Начало осаждения: когда температура на стенке трубы падает ниже критического уровня, молекулы парафина, растворенные в потоке, начинают оседать на холодной поверхности.

2. Формирование градиента: возникает разница в концентрации парафина между основным потоком жидкости и тонким слоем у стенки, что заставляет молекулы двигаться к стенке.

3. Рост слоя: парафин продолжает осаждаться, но теперь уже на поверхность ранее образовавшегося слоя, увеличивая его толщину.

4. Уплотнение отложения: молекулы парафина проникают внутрь существующего слоя, где со временем кристаллизуются, делая отложение более плотным и твердым.

Математическая модель базируется на системе уравнений теплопроводности и массопереноса в цилиндрических координатах для турбулентного режима течения. Динамика осаждения ПО описывается уравнением баланса в следующей работе [4]:

Для нахождения численного решения применяется метод конечных разностей. Суть метода заключается в том, что производные, входящие в исходные уравнения, аппроксимируются (заменяются) разностными отношениями. В результате сложная система дифференциальных уравнений преобразуется в более простую для вычислений систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Особенность получаемой системы – ее матрица имеет трехдиагональную структуру, что позволяет использовать для решения высокоеффективные специализированные алгоритмы (например, метод прогонки). Временная эволюция толщины отложений рассчитывается методом Эйлера второго порядка с шагом $dt = 1800$ секунд. Дискретизация пространства выполнена с шагом $dz = 2$ м в осевом направлении (1500 узлов на длину $L = 3000$ м).

Выходными параметрами модели являются: временная эволюция толщины отложений как функция времени и положения вдоль трубопровода, массовая доля парафина в отложениях, радиальное распределение температуры от стенки трубы до центра потока, радиальный профиль концентрации растворенного парафина, асимптотическая толщина отложений при достижении равновесия, изменение гидравлического сопротивления и эффективного диаметра трубы.

Экспериментальная часть

Программная реализация численной модели выполнена на языке C++ в среде Visual Studio 2019. Выбор компилируемого языка программирования обусловлен требованиями к производительности вычислений при работе с трехмерными матрицами данных и итеративными вычислениями в циклах. Модель осуществляет расчёт трёхмерных полей температуры и концентрации в диапазоне времени до 360 часов с шагом 1800 секунд. Совокупное количество итераций составляет минимум 1.5 миллиона расчетных шагов при дискретизации пространства на 50 радиальных и 1500 осевых узлов сетки.

Сравнительный анализ производительности показал существенное преимущество C++ перед интерпретируемыми языками. Для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) на матрице размерностью 100×100 типичное время выполнения в MATLAB с JIT-компиляцией составляет 8-12 миллисекунд на одну систему, в то время как C++ с использованием оптимизированных библиотек Eigen обеспечивает время 0.05-0.15 миллисекунд. При произведении вычислений 300 временных шагов \times 1500 осевых узлов = 252000 операций приблизительное время выполнения в MATLAB составило бы около 70 часов, тогда как в C++ – около 42 минут. Таким образом, использование C++ обеспечивает ускорение примерно в 100 раз.

Алгоритм программной реализации включает следующие этапы. На каждом временном слое выполняется расчёт температурного поля T путем решения уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах. Используется неявная схема интегрирования по направлению z (схема против потока) и консервативная разностная схема в радиальном направлении. На каждом осевом шаге решается трёхдиагональная СЛАУ размерностью 100×100 .

Следующий этап – генерирование поля константы скорости осаждения k_r на основе локальной температуры и режима течения. Осаждение активируется только в турбулентном режиме ($Re > 4000$) и при условии, что локальная температура ниже температуры помутнения $WAT = 39^\circ\text{C}$.

Третий этап – расчёт поля концентрации парафина C путем решения уравнения конвекции-диффузии-реакции. Эффективный коэффициент диффузии массы складывается из молекулярной и турбулентной диффузии.

Заключительный этап – расчёт толщины отложений на основе градиентов концентрации вблизи стенки [4].

Система визуализации интегрирована с использованием библиотеки PlotLib (или альтернативно matplotlib для C++) для обеспечения вывода двумерных и трёхмерных графиков распределения температуры, концентрации и толщины отложений по длине трубопровода. Графики поддерживают динамическое изменение масштаба, перемещение и интерактивное выделение диапазонов для детального анализа. Пользователь сможет выбирать конкретный временной слой через интерфейс, визуализируя эволюцию параметров во времени. Профиль толщины отложения визуализируется в виде трёхмерной поверхности с цветовой схемой, отражающей интенсивность осаждения. Реализована функциональность сохранения и загрузки состояния расчетов в бинарный формат.

Заключение

В результате проведенного исследования выполнен комплексный анализ математических моделей образования парафиновых отложений в магистральных нефтепроводах. Изучена предметная область, включающая физико-химические механизмы массопереноса и фазовых переходов, механизмы молекулярной диффузии, сдвиговой дисперсии, броуновской диффузии и гравитационного осаждения. Исследованы температурные условия и режимы течения потока, определяющие интенсивность образования парафиновых отложений.

Проведен сравнительный анализ существующих математических моделей и программных комплексов, включая коммерческие решения OLGA Wax, DeroWax, TUWAX и академическую модель MWP. Обоснован выбор предложенной модели как наиболее точной и универсальной благодаря её фундаментальному физико-химическому основанию, отсутствию требуемых параметров настройки и минимальным отклонениям от экспериментальных данных (около 1% для толщины отложений).

Разработан прототип программного инструмента для прогнозирования ПО на языке C++ в среде Visual Studio 2019, обеспечивающий высокую производительность вычислений. Экспериментально подтверждено по сравнению с интерпретируемыми языками при решении систем линейных алгебраических уравнений. Реализован алгоритм последовательного решения уравнений теплопроводности, генерирования поля константы скорости осаждения, расчета концентрации воска и обновления толщины отложений с использованием метода конечных разностей и трехдиагональных матриц.

Созданный инструмент позволяет рассчитывать эволюцию толщины отложений во времени и пространстве, определять безопасные интервалы между механическими очистками трубопровода, визуализировать температурные и концентрационные поля. Результаты исследования могут применяться для оптимизации режимов эксплуатации магистральных нефтепроводов, планирования профилактических мероприятий и снижения эксплуатационных затрат. Предложенная архитектура обеспечивает масштабируемость, надёжность и поддерживаемость кода благодаря объектно-ориентированному проектированию.

Список использованных источников и литературы

1. Тронов, В.П. Механизм образования смоло-парафиновых отложений и борьба с ними [Текст] / В.П. Тронов. – М.: Недра, 1970. – 192 с.
2. Коробов, Г.Ю., Парfenov, Д.В., Нгуен Ван Тханг. Механизмы образования асфальтосмолопарафиновых отложений и факторы их формирования [Электронный ресурс] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 103-116. – URL: <https://izvestiya.tpu.ru> (дата обращения: 11.11.2025)
3. Ли, Х. Компьютерное и реологическое исследование отложения и гелеобразования парафинов в подводных трубопроводах [Электронный ресурс]: Репозиторий Мичиганского университета. – URL: <https://deepblue.lib.umich.edu> (дата обращения: 15.07.2025).
4. Неку чаев В. О., Тарсин А. В. Постановка задачи численного моделирования осаждения АСПО в магистральном нефтепроводе // Рассохинские чтения – 2025 : материалы конференции / под редакцией Р. В. Агиней. – Ухта : Изд-во УГТУ, 2025. – С. 364-369.

List of references

1. Tronov, V.P. The mechanism of formation of resin-paraffin deposits and the fight against them [Text] / V.P. Tronov. – M.: Nedra, 1970. – 192 p.
2. Korobov, G.Yu., Parfenov, D.V., Nguyen Van Thang. Mechanisms of formation of asphalt, resin and paraffin deposits and factors of their formation [Electronic resource] // News of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. – 2023. – T. 334. – No. 4. – P. 103-116. – URL: <https://izvestiya.tpu.ru> (date of access: 11/11/2025).
3. Lee, H. Computational and Rheological Study of Wax Deposition and Gelation in Subsea Pipelines [Электронный ресурс]: University of Michigan Repository – URL: <https://deepblue.lib.umich.edu> (дата обращения: 15.07.2025).
4. Nekuchaev V. O., Tarsin A. V. Statement of the problem of numerical modeling of paraffin deposition in a main oil pipeline // Rassokhin readings – 2025: conference materials / edited by R. V. Aginey. – Ukhta: USTU Publishing House, 2025. – P. 364 369.