

УДК 621.6.035
МРНТИ 52.47.29

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108728>

Получена: 13.03.2024.

Одобрена: 06.09.2024.

Опубликована: 30.09.2024.

Оригинальное исследование

Опробование функциональных возможностей программного обеспечения OLGA для определения оптимальных режимов транспортировки нефти, препятствующих выпадению твёрдых частиц

М.У. Ерлепесов¹, О.И. Зайцев², А.А. Ермаков¹, С.К. Амиров¹, Ж.С. Урбисинов¹

¹Филиал ТОО «КМГ Инжиниринг» «КазНИПИМунайгаз», г. Актау, Казахстан

²Филиал компании "Шлюмберге Лоджелко Инк." в Республике Казахстан, г. Атырау, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В процессе эксплуатации все механические примеси, попадающие в коллектор через выкидные линии, оседают на дно вследствие снижения скорости потока, что приводит к уменьшению пропускной способности трубопроводной сети системы сбора, дальнейшему росту давления, а также к преждевременному износу оборудования. Для решения данной проблемы необходимо иметь представление о динамике и интенсивности образования осадка на дне трубопровода.

Цель. Оценить функциональные возможности и эффективность применения динамического симулятора мультифазного потока для решения задач, связанных с транспортом скважинной жидкости с наличием твёрдых частиц.

Материалы и методы. Для построения математической симуляции мультифазного потока с наличием твёрдых частиц в специализированном программном комплексе OLGA в качестве объекта исследования выбран один из нефтесборных коллекторов месторождения N с диаметром 159×10 мм и длиной 1600 м, сбор скважинной продукции в котором осуществляется с 16 скважин. При моделировании процессов с помощью симулятора OLGA обеспечивалось измерение параметров движения потока с различными диаметрами частиц и прогнозирование динамики параметров, таких как изменяющиеся во времени скорости потока, состав флюида, температуры и процесс осаждения твёрдых частиц.

Результаты. Для потока с диаметром частиц 104 мкм активное выпадение осадка происходит при расходах от 200 до 300 м³/сут. Начиная с расхода 400 м³/сут, поток достигает достаточной скорости, чтобы выносить частицы без существенного накопления в рассматриваемом трубопроводе. Вынос песка при расходе от 400 до 500 м³/сут происходит неравномерно, т.к. твёрдая фаза транспортируется в режиме подвижного осадка, который периодически накапливается в песчаную «пробку», увлекается потоком и выносится из трубопровода. Частицы с диаметром 150 мкм активно выпадают в осадок при расходах от 200 до 400 м³/сут; начиная с расхода 500 м³/сут, поток достигает достаточной скорости, чтобы выносить частицы без существенного накопления в рассматриваемом трубопроводе.

Заключение. Программа позволила выполнить расчёт динамической системы для различных диаметров твёрдых частиц в мультифазном потоке и решить поставленную задачу по оценке динамики накопления твёрдой фазы в трубопроводе и определению скорости потока флюида, необходимой для предотвращения образования осадка. Программа применима для реализации имитационного моделирования при формировании технических решений с целью минимизации рисков осаждения твёрдых частиц в нефтесборных трубопроводах при эксплуатации объектов наземной инфраструктуры.

Ключевые слова: твёрдые частицы, трубопровод, мультифазный поток, динамическое моделирование потока, гидравлический расчёт, скорость потока, давление.

Как цитировать:

Ерлепесов М.У., Зайцев О.И., Ермаков А.А., Амиров С.К., Урбисинов Ж.С. Опробование функциональных возможностей программного обеспечения OLGA для определения оптимальных режимов транспортировки нефти, препятствующих выпадению твёрдых частиц // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2024. Том 6, №3. С. 82–93. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108728>

UDC 621.6.035
CSCSTI 52.47.29

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108728>

Received: 13.03.2024.

Accepted: 06.09.2024.

Published: 30.09.2024.

Original article

Testing the functionality of OLGA software for determining optimal oil transport modes to prevent solid particle deposition.

Murat U. Yerlepessov¹, Oleg I. Zaitsev², Abay A. Yermekov¹, Sain K. Amirov¹, Zhuginis S. Urbissinov¹

¹Branch of KMG Engineering LLP KazNIPImunaigaz, Aktau, Kazakhstan

²Branch of Schlumberger Logelco Inc in the Republic of Kazakhstan, Atyrau, Kazakhstan

ABSTRACT

Background: During operation, all mechanical impurities entering the collector through the flow lines settle at the bottom due to a decrease in flow velocity. This leads to a reduction in the capacity of the pipeline network, increased pressure, and premature equipment wear. To address this issue it is essential to understand the dynamics and intensity of sludge formation at the bottom of the pipeline.

Aim: Evaluate the functionality and efficiency of the dynamic multiphase flow simulator in addressing challenges related to the transport of borehole fluid containing solid particles.

Materials and methods: To build a mathematical simulation of multiphase flow with solid particles using OLGA specialised software, we selected one of the oil gathering lines in field N, with a diameter of 159x10 mm and a length of 1600 m, as the study object. This oil gathering line collects production from 16 wells. The OLGA simulator was used to model the process and measure flow parameters with different particle diameters, predicting the dynamics of variables such as time-varying flow velocities, fluid composition, temperatures, and particulate deposition. For a flow with a particle diameter of 104 µm, active precipitation occurs at flow rates between 200 and 300 m³/day. At flow rates of 400 m³/day and above, the velocity is sufficient to carry the particles without significant accumulation in the pipeline.

Results: The software enabled the calculation of the dynamic system for different solid particle diameters in multiphase flow, addressing the challenge of evaluating the dynamics of solid phase accumulation in the pipeline and determining the fluid flow velocity required to prevent sludge formation. The software is suitable for implementing simulation modelling to develop technical solutions that minimise the risks of solid particle deposition in oil gathering pipelines during the operation of on-shore infrastructure facilities.

Conclusion: The software enabled the calculation of the dynamic system for different solid particle diameters in multiphase flow, addressing the challenge of evaluating the dynamics of solid phase accumulation in the pipeline and determining the fluid flow velocity required to prevent sludge formation. The software is suitable for implementing simulation modelling to develop technical solutions that minimise the risks of solid particle deposition in oil gathering pipelines during the operation of on-shore infrastructure facilities.

Key words: *solid particles; pipeline; multiphase flow; dynamic flow modelling; hydraulic calculation; flow velocity; pressure.*

To cite this article:

Yerlepessov MU, Zaitsev OI, Yermekov AA, Amirov SK, Urbissinov ZS. Testing the functionality of OLGA software for determining optimal oil transport modes to prevent solid particle deposition. *Kazakhstan journal for oil & gas industry*. 2024;6(3):82–93. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108728>

ӨОЖ 621.6.035
ГТАХР 52.47.29

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108728>

Қабылданды: 13.03.2024.

Мақұлданды: 06.09.2024.

Жарияланды: 30.09.2024.

Түпнұсқа зерттеу

Қатты бөлшектердің тұнбаға түсуін болдырмайтын мұнайды тасымалдаудың оңтайлы режимдерін анықтау үшін OLGA бағдарламалық жасақтамасының функционалдығын тексеру

М.У. Ерлепесов¹, О.И. Зайцев², А.А. Ермаков¹, С.К. Амиров¹, Ж.С. Үрбісінов¹

¹КМГ Инжиниринг «ҚазНИПИМұнайгаз» филиалы, Ақтау қаласы, Қазақстан

²Қазақстан Республикасындағы "Шлюмберже Лоджелко Инк." компаниясы филиалы, Атырау қаласы, Қазақстан

АННОТАЦИЯ

Негіздеу. Жұмыс кезінде коллекторға ағын желілері арқылы түсетін барлық механикалық қоспалар ағын жылдамдығының төмендеуіне байланысты түбіне шөгеді, бұл коллекторлық жүйенің құбыр желісінің өткізу қабілетінің төмендеуіне, қысымның одан әрі жоғарылауына, сондай-ақ жабдықтың мерзімінен бұрын тозуына апарды. Бұл мәселені шешу үшін құбыр түбіндегі шөгінділердің пайда болу динамикасы мен қарқындылығы туралы түсінік болуы керек.

Мақсаты. Қатты бөлшектердің қатысуымен ұңғыма сұйықтығын тасымалдауға байланысты мәселелерді шешу үшін динамикалық көпфазалы ағынды симуляторды пайдаланудың функционалдығы мен тиімділігін бағалау.

Материалдар мен әдістер. OLGA мамандандырылған бағдарламалық кешенінде қатты бөлшектердің болуымен мультифазалық ағынның математикалық модельдеуін құру үшін зерттеу объектісі ретінде диаметрі 159×10 мм және ұзындығы 1600 м N кен орнының мұнай жинайтын коллекторларының бірі таңдалды, оның ұңғыма өнімін жинау 16 ұңғымадан жүзеге асырылады. OLGA симуляторын процестерді модельдеу кезінде бөлшектердің әртүрлі диаметрлерімен ағынның қозғалыс параметрлерін өлшеу және уақыт бойынша өзгеретін ағын жылдамдығы, сұйықтық құрамы, температура және бөлшектердің тұндыру процесі сияқты параметрлер динамикасын болжау қамтамасыз етілді.

Нәтижелері. Бөлшектердің диаметрі 104 мкм болатын ағын үшін 200-ден 300 м³/тәу-ге дейінгі ағын жылдамдығында белсенді тұндыру жүреді. 400 м³/тәулігіне ағын жылдамдығынан бастап, ағын қаралып отырған құбырда айтарлықтай жинақталмай бөлшектерді тасымалдау үшін жеткілікті жылдамдыққа жетеді. Тәулігіне 400-ден 500 м³-ге дейінгі шығында құмды тазалау біркелкі емес жүреді, өйткені қатты фаза жылжымалы шөгінді режимінде тасымалданады, ол мезгіл-мезгіл құм «тығында» жиналып, ағынмен тасымалданады және құбырдан жүзеге асырылады. Диаметрі 150 мкм бөлшектер 200-ден 400 м³/тәулігіне дейінгі ағын жылдамдығында белсенді түрде тұнбаға түседі; 500 м³/тәулігіне ағын жылдамдығынан бастап, ағын қаралып отырған құбырда айтарлықтай жинақталмай бөлшектерді тасымалдау үшін жеткілікті жылдамдыққа жетеді.

Қорытынды. Бағдарлама көпфазалы ағындағы қатты бөлшектердің әртүрлі диаметрлері үшін динамикалық жүйені есептеуге және құбырдағы қатты фазаның жиналу динамикасын бағалау және шөгінділердің пайда болуын болдырмау үшін қажетті сұйықтық ағынының жылдамдығын анықтау мәселесін шешуге мүмкіндік берді. Бағдарлама жерүсті инфрақұрылым объектілерін пайдалану кезінде мұнай жинау құбырларында қатты бөлшектердің шөгу қаупін азайту мақсатында техникалық шешімдерді қалыптастыру кезінде имитациялық модельдеуді жүзеге асыру үшін қолданылады.

Негізгі сөздер: қатты бөлшектер, құбыр, мультифазалық ағын, динамикалық ағынды модельдеу, гидравликалық есептеу, ағын жылдамдығы, қысым.

Дәйексөз келтіру үшін:

Ерлепесов М.У., Зайцев О.И., Ермаков А.А., Амиров С.К., Үрбісінов Ж.С. Қатты бөлшектердің тұнбаға түсуін болдырмайтын мұнайды тасымалдаудың оңтайлы режимдерін анықтау үшін OLGA бағдарламалық жасақтамасының функционалдығын тексеру // Қазақстанның мұнай-газ саласының хабаршысы. 2024. 6 том, №3. 82–93 б. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108728>.

Введение

Проблема наличия существенной концентрации твёрдой фазы в потоке обусловлена постепенным разрушением призабойной зоны с последующим выносом частиц на поверхность [1]. По мере интенсификации данных процессов возрастают риски, связанные со стабильностью потока. Накопление песчаного осадка создает дополнительное гидравлическое сопротивление, что приводит к росту давления, снижению пропускной способности трубопроводной сети и к соответствующему снижению добычи. В совокупности с эрозионным воздействием частиц данные факторы могут привести к преждевременному износу оборудования и дополнительному экономическому ущербу для недропользователя [2–5]. Именно поэтому качественная и количественная оценка вышеуказанных процессов очень важна как на стадии проектирования, когда необходимо заложить наиболее оптимальные параметры оборудования, так и на стадии эксплуатации, когда требуется определять риски и способы их нивелирования [6–7].

Одним из решений подобных задач является возможность применения симуляторов, позволяющих создать подробную математическую модель от забоя скважины до приёмного оборудования с детальным расчётом потерь давления и температуры вдоль всей системы в рамках заданного временного интервала, к примеру, такого как программное обеспечение (далее – ПО) OLGA.

Целью данной работы является проведение оценки функциональных возможностей и эффективности применения ПО OLGA для решения задач, связанных с состоянием твёрдой фазы в потоке. Исследование заключается в:

- 1) определении методики расчёта и необходимых исходных данных;
- 2) выявлении наиболее эффективного процесса для построения и анализа модели;
- 3) проведении серии динамических расчётов с их последующим анализом.

Основными этапами проведения гидродинамического расчёта являются:

- идентификация ограничений, связанных с наличием твёрдых частиц в потоке;
- оценка условий образования осадка при различных размерах частиц;
- определение скорости потока, необходимой для предотвращения образования осадка.

Материалы и методы

Присутствие твёрдых частиц в потоке накладывает отпечаток на динамические расчёты потока углеводородного флюида. Дополнительное трение между частицами, частиц со стенками трубопровода и не-

посредственно с самим флюидом создаёт дополнительные потери давления по всей его длине. В зависимости от фазовых скоростей и проскальзывания будет меняться характер движения твёрдых частиц, а также динамика их осаждения на нижней образующей трубопровода [8].

Функционал ПО OLGA позволяет использовать различные переменные для анализа стабильности потока в условиях присутствия твёрдых частиц, что даёт возможность получить детальное представление о характере течения, динамике осаждения твёрдых частиц, а также их движения как в потоке, так и в самом осадке. Наиболее часто используемые среди них это – толщина осадка, режим состояния осадка, массовый расход и объём частиц (поток, осадок, осадок + поток).

Для того, чтобы программа могла рассчитать течение мультифазного потока с содержанием твёрдых частиц, необходимо описать их характеристики и выбрать одну из двух методик расчёта: SIMPLE или ADVANCED [9].

Основным параметром, описывающим свойства твёрдой частицы, является её диаметр. На текущий момент обе методики позволяют внести только одно значение диаметра для описания всей твёрдой фазы. Также, помимо этого, необходимо указать плотность, угол естественного откоса, пористость осадка и массовую долю частиц в поступающем потоке. Данные параметры могут быть получены как из соответствующих исследований, так и из открытых источников.

Режим SIMPLE представляет собой упрощённую модель, позволяющую учесть движение твёрдой фазы в потоке и соответствующие дополнительные потери давления. Данный метод применим для расслоенного или кольцевого режима течения, а также предполагает равномерное движение частиц вдоль оси трубопровода без возможности оценки параметров формирования осадка.

Режим ADVANCED позволяет более детально раскрыть процессы взаимодействия твёрдых частиц с многофазным потоком, учитывая их обмен в потоке между нефтью, водой и газом. Данная методика применима для большинства режимов течения, а также учитывает движение частиц как в потоке, так и в сформированном осадке.

В рамках расчёта предполагается, что осадок состоит из двух подслоев: статичной части, называемой неподвижным слоем, и подвижной части, называемой движущимся слоем или наносом (рис. 1). Скорость осаждения частиц определяет размер осадка, в то время как его пористость определяет количество жидкости, захваченной в слое. Важно отметить, что течение жидкости сквозь неподвижную часть осадка не учитывается.

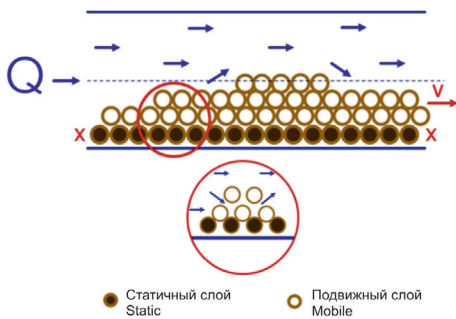


Рисунок 1. Слои осадка твёрдых частиц
Figure 1. Layers of sedimentation of solid particles

В зависимости от баланса сил, действующих на твёрдые частицы в сформированном осадке (сила тяготения, подъёмная сила, сила трения и др.), он может находиться в одном из трёх состояний: статичном, подвижном и взвешенном. При статичном состоянии преобладают силы трения, что делает невозможным движение твёрдых частиц. Подвижное состояние предполагает движение верхних слоев осадка, при котором подъемных сил всё ещё недостаточно, чтобы увлечь частицы в основной поток. Во взвешенном состоянии подъемные силы обеспечивают вынос твёрдых частиц из сформированного осадка, что приводит к их проникновению в движущиеся слои флюида.

Анализ и систематизация исходных данных

Не секрет, что точность и прогнозная способность математической модели напрямую зависят от качества исходных данных и, в первую очередь, от условий проведения лабораторных исследований, поэтому их подготовка и анализ являются важным этапом при моделировании.

В рамках построения модели для оценки динамики отложения твёрдых частиц в мультифазном потоке в условиях месторождения N можно выделить следующие этапы моделирования:

1. Построение модели трубопровода.

В данной работе в качестве исследуемого трубопровода принят один из нефтесборных коллекторов месторождения N с диаметром 159×10 мм и длиной 1600 м, сбор продукции которого осуществляется с 16 скважин и транспортируется далее на групповую замерную установку.

Помимо общей протяжённости и внутреннего диаметра для расчёта гидравлики, использовался детальный профиль трубопровода, который позволил учесть дополнительные сопротивления, связанные с рельефом местности (рис. 2) [10].

2. Воспроизведение свойств флюида.

При моделировании флюида в качестве основных исходных данных использовались лабораторные исследования по определению компонентного состава и физико-химических свойств, которые в совокупности с уравнениями состояния PVT (аббр. от *англ.* Pressure, Volume, Temperature – давление, объём, температура) пакетов позволили воспроизвести фазовую диаграмму (рис. 3), тем самым определив области многофазного и однофазного состояния флюида.

Кроме этого, была произведена настройка флюида на фактические значения вязкости разгазированной нефти. На рис. 3, б, красные точки соответствуют фактическим (лабораторным) значениям вязкости флюида при различных температурах, синяя линия – начальное воспроизведение вязкости PVT пакетом, жёлтая линия – значения вязкости после соответствующей настройки. Таким образом, из графика видно, что после настройки флюида удалось максимально точно воспроизвести данные лабораторных исследований, что позволило в дальнейшем использовать модель флюида максимально приближенную к реальности.

3. Описание параметров твёрдых частиц.

Согласно лабораторным исследованиям, гранулометрический состав проб осадка, взятых на месторождении, представлен частицами диаметром от 1,5 до 400 мкм. Ввиду того, что в программе модель осаждения твёрдых частиц использует одно значение в качестве диаметра, полученный диапазон потребовалось привести к единому значению. Поскольку величины крайних значений отличались друг от друга более чем в 250 раз, расчёт среднеарифметического был признан нецелесообразным. Для определения единого значения и более корректного усреднения было применено средневзвешенное значение, в котором в качестве веса каждого диаметра использовалась соответствующая доля в общем составе. Таким образом, единый размер частиц принят как средневзвешенный и равный 104 мкм (рис. 4).

Также для расчётов осаждения твёрдых частиц приняты следующие среднестатистические параметры:

- плотность частиц 2100 кг/м^3 ;
- угол естественного откоса 30° ;
- пористость осадка 0,35 д. ед.

4. Определение начальных и граничных условий моделирования.

В рамках оценки пропускной способности трубопровода рассматривалось 4 варианта работы системы с общими расходами 200, 300, 400 и $500 \text{ м}^3/\text{сут}$. Чтобы воспроизвести наиболее неблагоприятный сценарий выноса песка с забоя, было решено учитывать массовую концентрацию твёрдой фазы в потоке, равную 10%.

Для каждого варианта расхода был проведен динамический расчёт с продолжительностью 24 ч. Данная продолжительность задана исходя из необходимости выйти на установившийся режим работы системы и для последующей корректной оценки расчётных параметров.

В качестве граничных условий системы для всех сценариев были заданы: давление на выходе из трубопровода – 1,2 атм, температура флюида на входе – 36°C, температура окружающей среды – 20°C. Таким образом, фиксируя расход флюида и давление на выходе, определялось необходимое входное давление для обеспечения соответствующего дебита.

Результаты моделирования

Для определения ограничений, связанных с наличием твёрдых частиц в потоке, проведена оценка рисков образования песчаного осадка в рассматриваемом трубопроводе при различных расходах флюида. Поскольку гранулометрический состав выносимого песка представлен достаточно широким спектром диаметров, было решено провести дополнительную серию расчётов, предполагающую его увеличение на 50%, чтобы смоделировать поведение потока при ухудшении характеристик выносимого песка. Сравнение результатов моделирования со средневзвешенным и увеличенным диаметрами (табл. 1) позволили получить более целостную картину условий, необходимых для выноса песчаного осадка.

В рамках динамических расчётов в первую очередь определялись интенсивность и локализация участков выпадения осадка при различных сценариях. Сравнение производилось по результатам 24-часового моделирования работы системы. Сопоставлялись толщины сформированного осадка, общая масса твёрдой фазы в трубопроводе и массовый расход частиц на выходе из системы (рис. 5–10). Подробное описание результатов рассмотрено ниже.

1. Диаметр частиц 104 мкм.

Как видно из графиков (рис. 5–7), активное выпадение осадка происходит при расходе от 200 до 300 м³/сут. При этом его локализация (первые 500 м и впадина на расстоянии 1100 м) обусловлена относительно невысокой скоростью течения и геометрией трубопровода. Также стоит отметить, что для данных расходов в рамках 24-часового расчёта происходит постоянное накопление твёрдой фазы в трубопроводе с нулевым расходом твёрдой фазы на выходе.

Начиная с расхода 400 м³/сут, поток достигает достаточной скорости, чтобы выносить частицы диаметром 0,1 мм без существенного накопления в рассматриваемом трубопроводе. Соответственно, поддерживая расход выше данного значения, можно избежать интенсивного выпадения осадка.

Согласно графику массового расхода твёрдой фазы (рис. 7), вынос песка при расходе от 400 до 500 м³/сут происходит неравномерно. Это свидетельствует о том, что твёрдая фаза транспортируется в режиме подвижного осадка, который периодически накапливается в песчаную «пробку», увлекается потоком и выносится из трубопровода.

2. Диаметр частиц 150 мкм.

Согласно результатам расчётов (рис. 8–10), активное выпадение осадка происходит при расходах от 200 до 400 м³/сут. При этом локализация аналогична кейсам, рассматриваемым ранее: первые 500 м трубопровода, а также впадина на расстоянии 1100 м.

Для расходов менее 300 м³/сут происходит постоянное накопление твёрдой фазы в трубопроводе без выноса песка в рамках 24-часового расчёта.

При расходе 400 м³/сут в течение первых 16 ч происходит активное выпадение и накопление осадка, после чего происходит стабилизация его количества и выход на установившийся режим, о чем свидетельствуют графики массового расхода (рис. 8) и динамики накопления твёрдой фазы в трубопроводе (рис. 9).

Таблица 1. Сводные результаты расчёта с размерами частиц, равных 0,1 мм и 0,15 мм
Table 1. Summary of calculation results for particle sizes of 0.1 mm and 0.15 mm

Диаметр частиц, мм Particle diameter, mm	Расход, м ³ /сут Flow rate, m ³ /day	Входное давление, атм Inlet pressure, atm	Максимальная толщина осадка, мм Inlet pressure, atm	Масса твёрдой фазы, кг Weight of solid phase, kg	Максимальный массовый расход, кг/с Maximum mass flow rate, kg/s
0,1	200	1,9	34	200	-
	300	2,2	30	300	-
	400	2,6	3	15	0,055
	500	3,0	1	7	0,04
0,15	200	1,9	37	200	-
	300	2,3	24	300	-
	400	2,8	18	245	0,1
	500	3,3	10	55	0,085

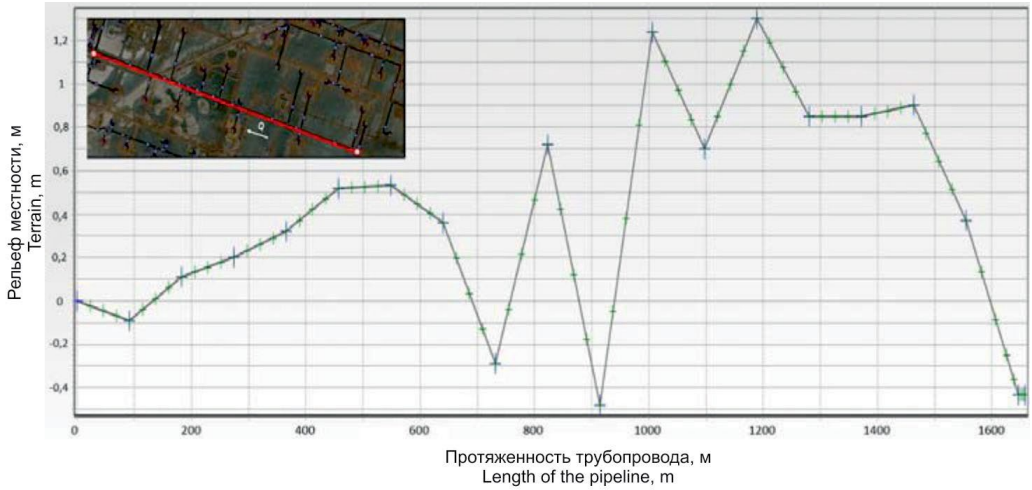


Рисунок 2. Расположение и профиль трубопровода в модели сети сбора
Figure 2. Location and profile of the pipeline in the model of oil-collection network

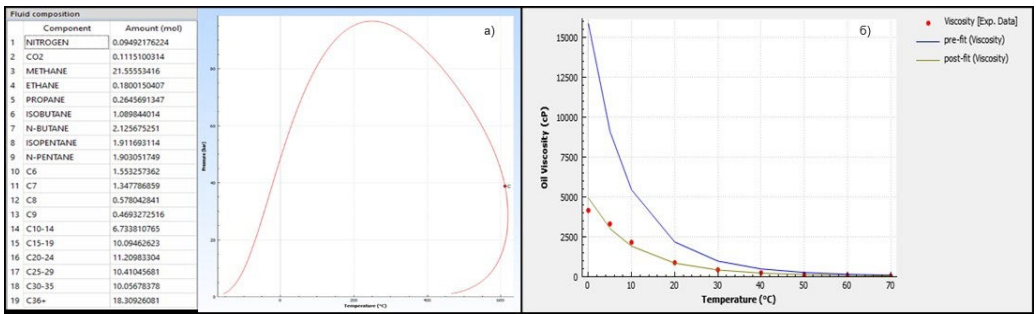


Рисунок 3. Воспроизведение и настройка свойств флюида
Figure 3. Reproducing and adjusting fluid properties

а) компонентный состав и фазовая диаграмма используемого флюида / compositional analysis and phase diagram of the fluid used; б) настройка флюида на фактические данные по вязкости в ПО Multiflash / adjusting the fluid to the actual viscosity data in Multiflash software

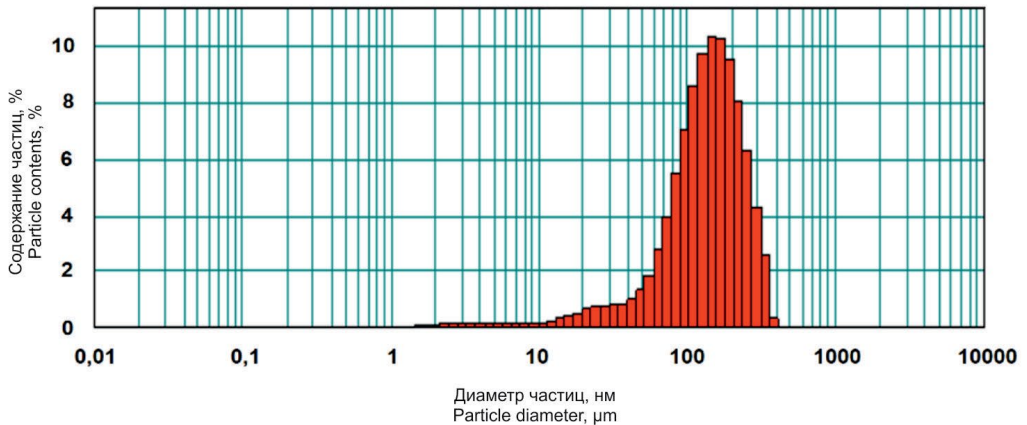


Рисунок 4. Гранулометрический состав осадка рассматриваемого коллектора
Figure 4. Granulometric composition of the sediment of the reservoir under consideration

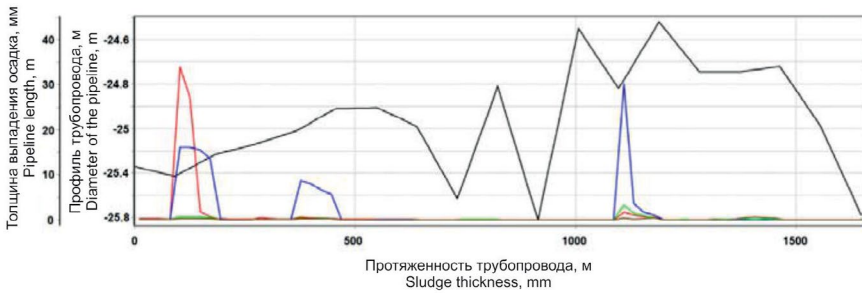


Рисунок 5. Профиль толщин песчаного осадка моделирования в течение 24 ч
Figure 5. Thickness profile of sand sludge over 24 hours

Чёрной линией на рисунке показан профиль трубопровода. Красной линией показан профиль толщины осадка при расходе $200 \text{ м}^3/\text{сут}$, синей – при расходе $300 \text{ м}^3/\text{сут}$, зеленой – при расходе $400 \text{ м}^3/\text{сут}$, коричневой – при расходе $500 \text{ м}^3/\text{сут}$.

The black line represents the pipeline profile. The red line shows the sludge thickness profile at a flow rate of $200 \text{ м}^3/\text{д}$, the blue line – at $300 \text{ м}^3/\text{д}$, the green line – at $400 \text{ м}^3/\text{д}$, and the brown line – at $500 \text{ м}^3/\text{д}$.

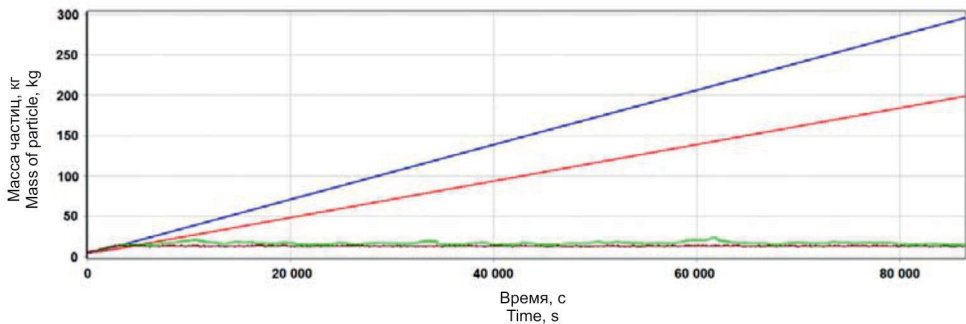


Рисунок 6. Динамика накопления твёрдых частиц диаметром 0,1 мм в трубопроводе при различных расходах
Figure 6. Dynamics of 0.1 mm diameter solid particle accumulation in the pipeline at different flow rates

Красной линией показан профиль толщины осадка при расходе $200 \text{ м}^3/\text{сут}$, синей – при расходе $300 \text{ м}^3/\text{сут}$, зеленой – при расходе $400 \text{ м}^3/\text{сут}$, коричневой – при расходе $500 \text{ м}^3/\text{сут}$.

The red line shows the sludge thickness profile at $200 \text{ м}^3/\text{д}$, the blue line – at $300 \text{ м}^3/\text{д}$, the green line – at $400 \text{ м}^3/\text{д}$, and the brown line – at $500 \text{ м}^3/\text{д}$.

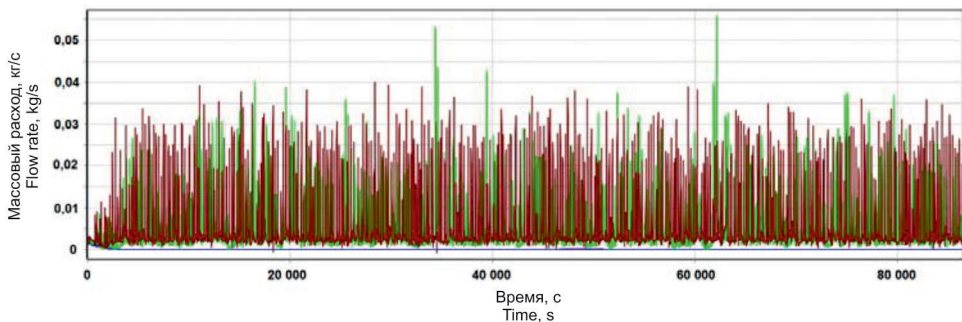


Рисунок 7. Динамика массового расхода твёрдой фазы (0,1 мм) на выходе из трубопровода при различных расходах флюида
Figure 7. Dynamics of the mass flow rate of the solid phase (0.1 mm) at the pipeline outlet at different fluid flow rates

Красной линией показан профиль толщины осадка при расходе $200 \text{ м}^3/\text{сут}$, синей – при расходе $300 \text{ м}^3/\text{сут}$, зеленой – при расходе $400 \text{ м}^3/\text{сут}$, коричневой – при расходе $500 \text{ м}^3/\text{сут}$.

The red line shows the sludge thickness profile at $200 \text{ м}^3/\text{д}$, the blue line – at $300 \text{ м}^3/\text{д}$, the green line – at $400 \text{ м}^3/\text{д}$, and the brown line – at $500 \text{ м}^3/\text{д}$.

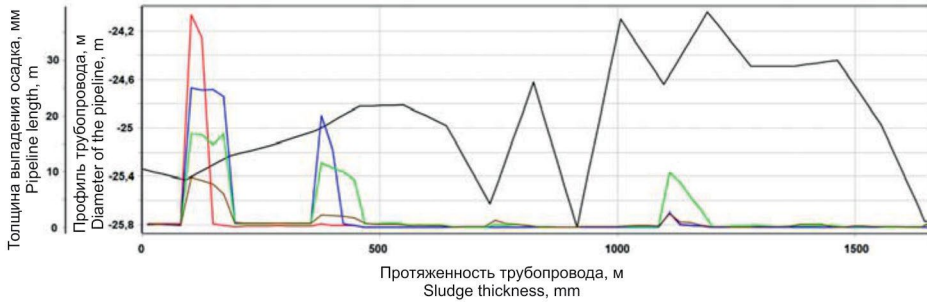


Рисунок 8. Профиль толщин песчаного осадка моделирования в течение 24 ч
Figure 8. Thickness profile of sand sludge over 24 hours

Чёрной линией показан профиль трубопровода. Красной линией показан профиль толщины осадка: при расходе 200 м³/сут; синей – при расходе 300 м³/сут; зеленой – при расходе 400 м³/сут; коричневой – при расходе 500 м³/сут.

The black line represents the pipeline profile. The red line shows the sludge thickness profile at a flow rate of 200 m³/d, the blue line – at 300 m³/d, the green line – at 400 m³/d, and the brown line – at 500 m³/d.

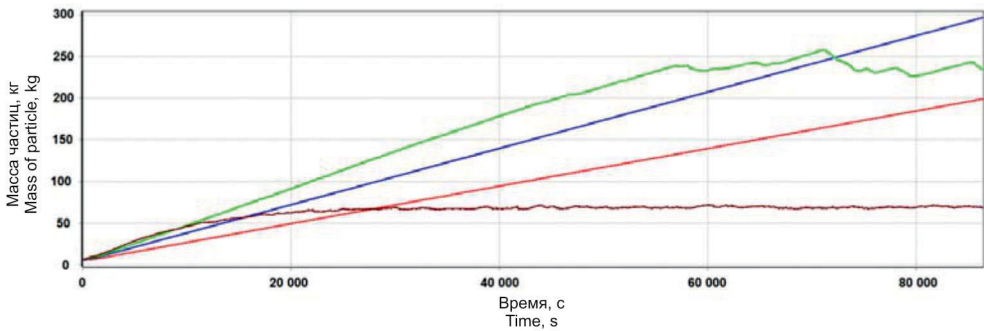


Рисунок 9. Динамика накопления твёрдых частиц диаметром 0,15 мм в трубопроводе при различных расходах
Figure 8. Dynamics of accumulation of 0.15 mm diameter solid particles in the pipeline at different flow rates

Красной линией показан расход 200 м³/сут; синей – 300 м³/сут; зеленой – 400 м³/сут; коричневой – 500 м³/сут.

The red line shows a flow rate of 200 m³/d; blue, 300 m³/d; green, 400 m³/d; and brown, 500 m³/d.



Рисунок 10. Динамика массового расхода твёрдой фазы (0,15 мм) на выходе из трубопровода при различных расходах жидкости
Figure 10. Dynamics of mass flow rate of solid phase (0.15 mm) at the pipeline outlet at different fluid flow rates

Красной линией показан профиль толщины осадка при расходе 200 м³/сут, синей – при расходе 300 м³/сут, зеленой – при расходе 400 м³/сут, коричневой – при расходе 500 м³/сут.

The red line shows the sludge thickness profile at a flow rate of 200 m³/d, the blue line – at 300 m³/d, the green line – at 400 m³/d, and the brown line – at 500 m³/d.

Начиная с расхода 500 м³/сут, поток достигает достаточной скорости, чтобы выносить частицы диаметром 0,15 мм без существенного накопления в рассматриваемом трубопроводе. Соответственно, поддерживая расход выше данного значения, можно избежать интенсивного выпадения осадка.

Согласно графику массового расхода твердой фазы, вынос песка при расходах от 400 до 500 м³/сут происходит неравномерно (рис. 10). Это свидетельствует о том, что твердая фаза транспортируется в режиме подвижно осадка, который периодически накапливается в песчаную «пробку», увлекается потоком и выносится из трубопровода. Кроме того, можно отметить периоды накопления, когда массовый расход твердой фазы практически отсутствует.

Рассчитанные давления на входе трубопровода представлены в табл. 1. Для расходов от 200 до 400 м³/сут ввиду относительно небольшой протяженности коллектора, накопительного режима осадка, а также одинаковой массовой концентрации при увеличении диаметра частиц с 0,1 мм до 0,15 мм разницы во входных давлениях не наблюдается. Для более высоких расходов в 400 и 500 м³/сут разница в начальных давлениях при увеличении диаметра частиц с 0,1 мм до 0,15 мм составила 0,2 и 0,3 атм соответственно.

Обсуждение

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что при увеличении диаметра

твердых частиц осадок будет образовываться более интенсивно и в большей области трубопровода. С учётом того, что фактически твердая фаза представлена песчинками разного размера, для того чтобы обеспечить стабильный режим работы трубопровода и избежать осаждения песка, необходим расход более 500 м³/сут. Таким образом, даже самые крупные частицы твердой фазы будут выноситься с потоком.

Данный диапазон может быть пересмотрен с учётом обновления лабораторных данных либо различных испытаний, позволяющих подтвердить либо опровергнуть выпадение осадка при определенном значении расхода.

Заключение

В данной работе была произведена оценка функциональных возможностей специализированного ПО для решения задач, связанных с моделированием мультифазного потока с содержанием твердых частиц.

Программа позволила выполнить расчёт динамической системы для различных значений диаметра твердых частиц в мультифазном потоке и решить поставленную задачу по оценке динамики накопления твердой фазы в трубопроводе и определению скорости потока флюида, необходимой для выноса твердых частиц.

Программа применима для реализации имитационного моделирования при формировании технических решений с целью минимизации рисков эксплуатации линейных объектов наземной инфраструктуры.

специализированного программного обеспечения.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Ерлепесов М.У. – разработка концепции исследования; Зайцев О.И. – выполнение расчетной части в специализированном ПО, анализ и последующая интерпретация данных исследования; Ермаков А.А. – разработка основ проведения исследования, контроль за ходом его проведения, а также общая редакция рукописи статьи; Амиров С.К. – систематизация и обработка данных исследования; Урбисинов Ж.С. – техническое сопровождение

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. The greatest contribution is distributed as follows: Murat U. Yerlepessov – development of the research concept; Oleg I. Zaitsev – calculation in specialised software, analysis and subsequent interpretation of the research data; Abay A. Yermekov – development of the research design, control over the research progress, and general revision of the article manuscript; Sain K. Amirov – systematisation and processing of the research data; Zhuginis S. Urbissinov – technical support of the specialised software

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tao Y, Chen J, Liu J. Application and Practice of Integrated Sand Control Technology in Shallow Heavy Oil Reservoirs in Kazakhstan // SPE Annual Caspian Technical Conference; Ноябрь 15–17, 2022; Астана, Казахстан. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPECTCE/proceedings-abstract/22CTC/1-22CTC/514602>. Дата обращения: 14.09.2023.
2. Тахерифард А., Елистратов В.В. Численное моделирование эрозии в трубе при многофазном потоке нефти и газа // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Том 307. С. 16–28.
3. Solnordal C.B., Wong C.Y., Boulanger J. An experimental and numerical analysis of erosion caused by sand pneumatically conveyed through a standard pipe elbow // *Wear*. 2015. Vol. 336–337. P. 43–57. doi: 10.1016/j.wear.2015.04.017.
4. Pereira G.C., de Souza F.J., de Moro Martins D.A. Numerical prediction of the erosion due to particles in elbows // *Powder Technology*. 2014. Vol. 261. P. 105–117. doi: 10.1016/j.powtec.2014.04.033.
5. Zhang Y., Reuterfors E.P., McLaury B.S., et al. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows // *Wear*. 2007. Vol. 263, Issue 1–6. P. 330–338. doi: 10.1016/j.wear.2006.12.048.
6. Najmi K., McLaury B.S., Shirazi S.A., Cremaschi S. Low concentration sand transport in multiphase viscous horizontal pipes: An experimental study and modeling guideline // *AIChE J*. 2016. Vol. 62. P. 1821–1833. doi: 10.1002/aic.15131.
7. Wicks M. Transport of solids at low concentration in horizontal pipes // *Advances in Solid-Liquid Flow in Pipes and Its Application*; March 4–6, 1968; Pennsylvania, PA. Режим доступа: <https://trid.trb.org/view/19654>. Дата обращения: 12.12.2023.
8. al-Mutahar F. Modeling of Critical Deposition Velocity of Sand in Horizontal and Inclined Pipes : MSc Thesis. Tulsa : Department of Mechanical Engineering, The University of Tulsa, 2006.
9. Обеспечение стабильности потока. ПО «OLGA». Руководство пользователя. Компания Schlumberger, 2023.
10. Ермеков А.А., Баспаева А.Т., Амиров С.К. Применение моделирования для оптимизации системы нефтесбора месторождения N // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2023. Том 5, №1. С. 94–102. doi: 10.54859/kjogi108599.

REFERENCES

1. Tao Y, Chen J, Liu J. Application and Practice of Integrated Sand Control Technology in Shallow Heavy Oil Reservoirs in Kazakhstan. SPE Annual Caspian Technical Conference; Nov 15–17, 2022; Astana, Kazakhstan. Available from: <https://onepetro.org/SPECTCE/proceedings-abstract/22CTC/1-22CTC/514602>.
2. Taherifard A, Elistratov VV. Numerical Simulation of Erosion in a Pipe Under a Multi-Phase Oil and Gas Flow. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;307:16–28. (In Russ.).
3. Solnordal CB, Wong CY, Boulanger J. An experimental and numerical analysis of erosion caused by sand pneumatically conveyed through a standard pipe elbow. *Wear*. 2015;336:43-57. doi: 10.1016/j.wear.2015.04.017.
4. Pereira GC, de Souza FJ, de Moro Martins DA. Numerical prediction of the erosion due to particles in elbows. *Powder Technology*. 2014;261:105-117. doi: 10.1016/j.powtec.2014.04.033.
5. Zhang Y, Reuterfors EP, McLaury BS, et al. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows. *Wear*. 2007;263(1–6):330–338. doi: 10.1016/j.wear.2006.12.048.
6. Najmi K., McLaury B.S., Shirazi S.A., Cremaschi S. Low concentration sand transport in multiphase viscous horizontal pipes: An experimental study and modeling guideline. *AIChE J*. 2016;62:1821–1833. doi: 10.1002/aic.15131.
7. Wicks M. Transport of solids at low concentration in horizontal pipes. *Advances in Solid-Liquid Flow in Pipes and Its Application*; March 4–6, 1968; Pennsylvania, PA. Available from: <https://trid.trb.org/view/19654>.
8. al-Mutahar F. Modeling of Critical Deposition Velocity of Sand in Horizontal and Inclined Pipes : MSc Thesis. Tulsa : Department of Mechanical Engineering, The University of Tulsa, 2006.
9. OLGA Flow Assurance. Version 2017. Guide and exercises. Schlumberger, 2023.
10. Yermekov AA, Baspayeva AT, Amirov SK. Application of simulation to optimize the oil-gathering system of the “N” oil field. *Kazakhstan journal for oil & gas industry*. 2023;5(1):94–102. doi: 10.54859/kjogi108599.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**Ерлепесов Мурат Усенович**ORCID [0009-0007-8581-2786](#)e-mail: m.yerlepessov@kmge.kz.**Зайцев Олег Игоревич**ORCID [0009-0002-0443-655X](#)e-mail: ozaitcev2@slb.com.**Ермеков Абай Алматаевич**ORCID [0009-0003-2130-2489](#)e-mail: a.yermekov@kmge.kz.***Амиров Саин Кубейсинович**ORCID [0009-0005-7771-5535](#)e-mail: s.amirov@kmge.kz.**Урбисинов Жугинис Сытдыйхович**ORCID [0009-0008-9723-5565](#)e-mail: zh.urbissinov@kmge.kz.**AUTHORS' INFO****Murat U. Yerlepessov**ORCID [0009-0007-8581-2786](#)e-mail: m.yerlepessov@kmge.kz.**Oleg I. Zaitsev**ORCID [0009-0002-0443-655X](#)e-mail: ozaitcev2@slb.com.**Abay A. Yermekov**ORCID [0009-0003-2130-2489](#)e-mail: a.yermekov@kmge.kz.***Sain K. Amirov**ORCID [0009-0005-7771-5535](#)e-mail: s.amirov@kmge.kz.**Zhuginis S. Urbissinov**ORCID [0009-0008-9723-5565](#)e-mail: zh.urbissinov@kmge.kz.

*Автор, ответственный за переписку/Corresponding Author