

УДК 622.276:622.016.25:622.245:620.19

Симулятор многофазного потока PIPESIM – полный набор рабочих процессов для моделирования производственных операций

PIPESIM Multi-Phase Flow Simulator – Complete Set of Operation Processes to Simulate Industrial Operations



А.Ф. Садыков

/Schlumberger Software Integrated Solutions (SIS), ASadykov4@slb.com/

A.F. Sadykov
/“Schlumberger Software Integrated Solutions” (SIS)/

Рассматриваются проблемы, связанные с движением многофазных потоков. Как один из эффективных способов их анализа и контроля рассматривается моделирование движения многофазного потока. Представлен многофункциональный программный пакет – симулятор многофазного потока PIPESIM*, позволяющий точно моделировать многофазные потоки, их поведение и теплообмен. Рассказывается о моделировании многофазного потока в PIPESIM. Показаны функциональные возможности программы, позволяющие оптимизировать процессы добычи, повысить производительность скважин, предупредить риски, связанные с движением многофазного потока, и обеспечить безопасную и экономичную транспортировку флюида от пласта до пункта технологической обработки.

Ключевые слова: оптимизация разработки месторождений, моделирование многофазного потока, симулятор многофазного потока PIPESIM, трехфазные механистические модели, симулятор динамического многофазного потока OLGA*, бесперебойный режим подачи флюида, предотвращение гидратообразования, модели выпадения парафинов и асфальтенов, проектирование трубопровода, оптимальные заканчивания скважин, моделирование ШГН, проектирование и диагностика газлифтных скважин, модель коррозии, методы моделирования эрозии, метод «анализа чувствительности».

The paper considers the issue related to the movement of multi-phase flows being one of the effective methods of their analysis and control, and presents the simulation of multi-phase flow movement. It also presents the multi-functional software package, i.e. PIPESIM multi-phase flow simulator that ensures proper simulation of these multi-phase flows, their behavior and heat exchange. The authors discuss the multi-phase flow simulation process with PIPESIM and illustrate its functional capabilities that enable optimizing the production processes, increasing well productivity, prevent the risks related with the movement of multi-phase flow and guarantee safe and economic transportation of the fluid from the reservoir to the product treatment station.

Key words: Optimization of field development, simulation of multi-phase flow, PIPESIM simulator of multi-phase flow, three-phase mechanical models, OLGA dynamic multi-phase flow simulator, uninterrupted regime of fluid supply, hydrate formation control, model of paraffin and asphaltene deposition, designing of pipelines, optimum well completion, simulation of sucker rod pump, designing and diagnostics of gas-lift wells, model of corrosion, methods to simulate erosion, method of “sensitivity analysis”.

Оптимизация производственных процессов для месторождений, где затраты на добычу особенно высоки, становится не просто актуальной, но и приоритетной задачей. Для месторождений, вступивших в позднюю стадию, рациональный подход к их разработке особенно необходим. По мере увеличения обводненности количество

добываемой чистой нефти уменьшается, добыча на таких месторождениях может стать нерентабельной. Затраты на добычу высоки и для удаленных сухопутных и глубоководных морских месторождений со сложной инфраструктурой, месторождений с высоковязкой нефтью. Поэтому управление добычей за счет регулирования режимов эксплуатации

скважин рассматривается как один из самых эффективных способов сокращения издержек и увеличения прибыли. Впрочем, добывающие компании всегда заинтересованы в достижении максимального экономического результата. Поэтому на многих месторождениях, вводимых в эксплуатацию в последние годы, широко внедряются современные

* Марка Schlumberger.

технологические решения, позволяющие максимально оптимизировать разработку на всем их жизненном цикле. Главным фактором, обеспечивающим прорыв на пути оптимизации производственных процессов, является расширение применения интеллектуальных цифровых технологий. Эти технологии устраняют барьеры и расширяют взаимодействие; они направлены в большей степени на предупреждение негативных событий, нежели на ликвидацию их проявлений. Одним из наиболее эффективных методов определения области оптимальных режимов работы является моделирование. Благодаря интенсивному развитию современных технологий теперь моделировать сложные пласты стало легче, появилась возможность решения одной из самых трудных на сегодняшний день задач – моделирования многофазных потоков и контроля за их движением. Почему решение столь сложной задачи настолько важно? Если добываемый из скважины продукт многофазный, существует вероятность того, что скважина будет эксплуатироваться почти при всех режимах течения. При одновременном течении в скважине или трубопроводе нефти, воды и газа возникают серьезные производственные риски. Проблемы могут быть связаны с неустойчивостью течения, осаждением твердых компонентов, которые потенциально способны блокировать течение, эрозией и коррозией, являющимися причиной разрушения трубопровода. Проблемы отложения парафинов и асфальтенов могут стать настолько серьезными, что отложения полностью заблокируют трубопровод, а ремонт может стоить миллионы долларов. При определенных условиях многофазный поток способен оказать значительное негативное влияние на механическую устойчивость трубопровода, что повышает риски нарушения его механической целостности. Образование эмульсий в результате смешения нефти и воды может привести к проблемам переработки и повышенным затратам

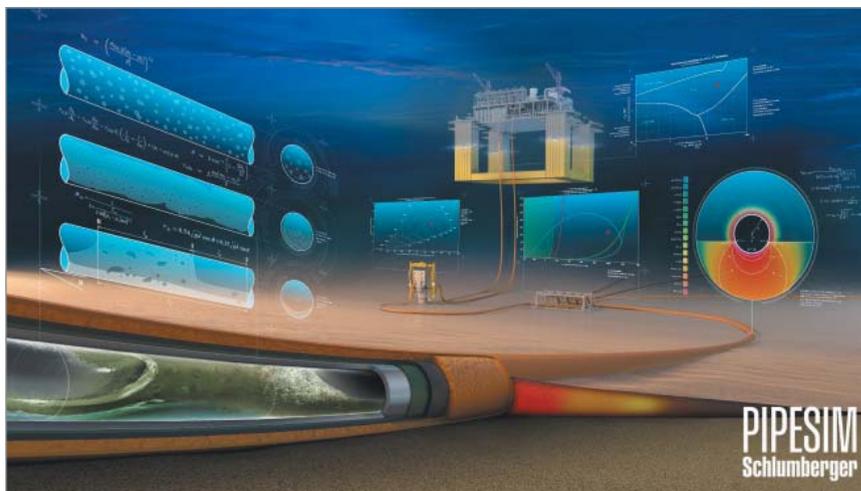


Рис. 1. Симулятор многофазного потока PIPESIM

на очистку. Поэтому анализ влияния многофазного потока и контроль за его движением – это важнейшая задача, и ее решение предупредило бы многие негативные события.

Начиная с 1984 г. корпорация Schlumberger проводит научные исследования, связанные с наблюдением и моделированием многофазных потоков. Процесс движения многофазного потока чрезвычайно сложен, тем не менее стремление «раскрыть код» многофазных потоков и серьезная работа по изучению их движения и поведения, механизмов теплообмена позволили перейти от теории к практике и внести значительный вклад в процессы управления скважинами и оптимизацию разработки месторождений. Созданный специалистами компании симулятор многофазного потока PIPESIM (рис. 1) выполняет большинство известных в отрасли операций для установившегося потока, а также позволяет рассматривать систему «скважина – трубопровод» как одно целое. Использование программы дает возможность быть уверенными в безопасности, эффективности и экономичности транспортировки флюида от пласта до этапа технологической обработки посредством выбора размеров подземного и наземного оборудования, трубопроводов, способа добычи.

Возможность точного моделирования различных сценариев и усло-

вий сделала PIPESIM лидирующим в отрасли инструментом моделирования установившегося многофазного течения. PIPESIM был впервые выпущен в 1984 г. и ориентирован на проектирование производственных систем, находящихся в суровых климатических условиях Северного моря. С тех пор PIPESIM непрерывно совершенствовался, расширяя свои возможности. На сегодняшний день симулятор не только моделирует многофазные потоки, но и позволяет выполнять оптимизацию добычи от отдельно взятых скважин до обширных сетей сбора в течение всего периода их эксплуатации. PIPESIM предоставляет широкий набор рабочих процессов: от выбора скважин-кандидатов для капитального ремонта до выявления проблем в бесперебойном режиме подачи флюида.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА В PIPESIM

PIPESIM объединяет широкий спектр стандартных корреляций для многофазных потоков, а также передовые трехфазные механистические модели, включая:

- OLGAS, основанную на симуляторе динамического многофазного потока OLGА;
- модель LedaFlow Point;
- модель Tulsa University Fluid Flow Projects (TUFFP).

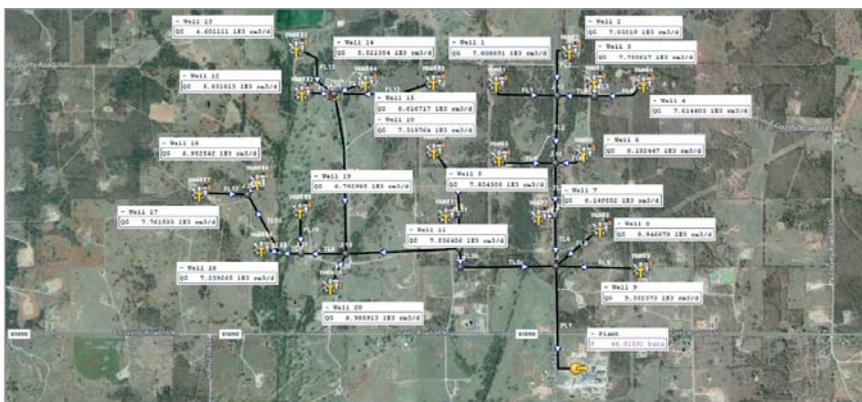


Рис. 2. Визуализация результатов расчета

Модели потока учитывают эффект проскальзывания и режимы течения, характеристики пробок и потери давления на всем производственном пути. Это, в свою очередь, позволяет рассчитывать режимы потока, задержку жидкости, характеристики пробки и потери давления для всех узлов добывающей системы.

PIPESIM содержит опцию, позволяющую автоматически подобрать множители коэффициентов задержки жидкости и трения, множитель коэффициента теплопередачи U value для настройки на фактические замеры давления и температуры. Кроме того, операция сравнения корреляций потока помогает быстро подобрать оптимальную модель. Точное прогнозирование параметров теплопередачи важно для расчета зависящих от температуры свойств флюида, прогнозирования формирования твердых фаз и дизайна общей тепловой модели системы. PIPESIM учитывает различные механизмы теплопередачи, включая конвекцию (естественную, вынужденную),

теплопроводность, возвышение, эффект Джоуля – Томсона, фрикционный нагрев. Модели теплопередачи в PIPESIM включают зависящий от режима течения коэффициент теплопроводности внутренней стенки трубопровода и методики расчета теплопередачи в заглубленных и частично заглубленных трубах.

Благодаря данным опциям пользователь может с уверенностью моделировать системы сбора и распределения и управлять ими.

Точное описание поведения флюида имеет решающее значение для корректного моделирования производственной системы. PIPESIM предоставляет выбор между моделями «нелетучей нефти» Black-oil или рядом композиционных моделей. В зависимости от типа флюида пользователи могут сделать выбор из широкого набора функций для моделирования PVT-свойств флюида.

PIPESIM имеет шаблоны, которые могут быть использованы пользователем для программирования собственных алгоритмов расчета

двухфазной и трехфазной корреляции. Созданная dll-библиотека на основе шаблона может быть подключена как плагин.

Программа позволяет создать детализированные карты режимов потока в любой точке системы, где это необходимо, с учетом профиля трассы (рис. 2).

PIPESIM часто применяется для выявления ситуаций, которые в дальнейшем требуют более детального подхода к моделированию неустановившегося течения, с использованием OLGA. К таким случаям можно отнести остановку/запуск скважин, вывод скважин на режим, удаление гидратов, очистку скважин и трубопроводов. Совместно PIPESIM и OLGA предлагают наиболее комплексное решение задач моделирования при изучении систем мультифазного потока.

Управление рисками, их прогнозирование, принятие решений, которые помогут их предотвратить, – одно из ключевых звеньев в цепи оптимизации производственных процессов. PIPESIM позволяет избежать множества проблем, сопряженных с течением многофазного потока. Одной из наиболее серьезных проблем, сопутствующих движению многофазных потоков, может стать образование гидратов, которые, если их не удалять, способны приводить к закупорке. После того как образовалась пробка, требуется вмешательство, которое может привести к значительным простоям и финансовым потерям. Поэтому очень важно эффективно проектировать трубопроводную систему (особенно морскую) и управлять ею с учетом рисков образования гидратов. Прогнозирование образования гидродинамических пробок, их размера и частоты позволяет оптимизировать конструкцию трубопровода и технологического оборудования. PIPESIM включает в себя разные стратегии предотвращения гидратообразования. При выборе способа теплоизоляции можно детально изучать механизм передачи тепла, эффективность изоляции

и заглупления трубопровода. При принятии решения о закачке химреагентов возможно определить необходимые дозировки для предотвращения гидратообразования. Кривые гидратов могут быть вычислены с помощью модуля PIPESIM Multiflash-Hydrates и наложены на фазовую диаграмму. Эти кривые полезны на стадиях проектирования и эксплуатации подводных трубопроводов, т. к. обеспечивают моделирование условий давления и температуры, которые система должна поддерживать, чтобы избежать образования гидратов. Серьезные проблемы в подземном технологическом оборудовании могут вызвать гидравлические пробки. PIPESIM моделирует два типа такого течения: газожидкостные пробки, гидродинамические пробки.

PIPESIM также прогнозирует возникновение пульсаций в райзерах (морских стояках).

При снижении температуры сырой нефти тяжелые твердые вещества, такие как парафин и воск, могут выпадать в осадок и накапливаться на стенках труб. Снижение внутреннего диаметра приводит к повышению перепада давления, а в ряде случаев АСПО способны полностью заблокировать трубопровод. PIPESIM имеет в своем арсенале модели выпадения парафинов и асфальтенов в качестве дополнения к пакету Multiflash PVT.

PIPESIM позволяет выбрать оборудование различного типа для определения его влияния на конструкцию всей системы. При проектировании систем в PIPESIM могут быть использованы сложные анализы чувствительности с изменением ключевых параметров расчета. Это позволяет максимально корректно выполнять расчеты трубопроводных систем и подбирать оборудование (насосы, компрессоры, мультифазные бустеры и т. д.) с оптимальными параметрами и характеристиками, устанавливать режимы работы насосных и компрессорных станций, определять оптимальные и эффективные режимы перекачки.

В PIPESIM присутствует геоинформационный компонент. Использование этого компонента дает возможность представить истинное расположение скважин, оборудования, сетей трубопроводов, рассмотреть топографию, рельеф местности, получить более полное представление о реальных полевых условиях, что позволяет учесть прежде неизвестные физические препятствия при принятии решений. На изображенную местность можно накладывать дополнительные слои, например кадастровую информацию, что особенно широко используется там, где имеется большое количество объектов, где присутствуют природоохранные зоны, водоотводы, границы лицензионных участков. Все это помогает правильно выбрать трассу, а в дальнейшем минимизировать различные осложнения.

Таким образом, симулятор многофазного потока PIPESIM позволяет точно моделировать многофазные потоки, их поведение и теплообмен, обеспечивать бесперебойный и безопасный режим подачи потока, надежную доставку пластовых флюидов до пункта назначения, предупреждать возможные риски и корректно проектировать и анализировать системы сбора/транспортировки/добычи.

PIPESIM И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СКВАЖИН

Проблема оптимизации системы добычи особенно актуальна для месторождений, вступивших в позднюю стадию разработки. Очевидно, что для определения того, является ли скважина по-прежнему экономически жизнеспособной, необходимы точные данные о количестве добытой чистой нефти. PIPESIM может быть использован не только как средство моделирования многофазного потока, но и как точный, быстрый и эффективный способ помочь пользователю оценить потенциал пласта, увеличить производительность и произвести расчет ме-

ханизированных способов добычи, включая использование штанговых, винтовых, электроцентробежных насосов и газлифта. Интерактивное графическое представление ствола скважины позволяет пользователю быстро создать модель скважины и просмотреть смоделированные линии тока на диаграмме. Кроме того, не переключаясь на сетевой режим, можно легко задать режим наземного оборудования и флюида.

PIPESIM позволяет проектировать оптимальные заканчивания скважин и включает в себя все стандартные кривые притока для вертикальных, горизонтальных скважин и скважин с различными видами заканчиваний, например ГРП. С помощью PIPESIM моделируются сложные многопластовые заканчивания с использованием множества параметров притока и флюида.

Среди возможностей PIPESIM – моделирование современных установок ШГН, включая непосредственно сам станок-качалку, электродвигатель, насос, колонну штанг и НКТ. Конечная цель – подбор оптимального оборудования для конкретной скважины.

PIPESIM позволяет выбрать наиболее подходящий метод механизированного подъема и провести детальное проектирование газлифта или ЭЦН. Инструменты оценки чувствительности позволяют проанализировать параметры механизированной добычи (объем закачки газа/количество ступеней ЭЦН) так, чтобы получить оптимальную добычу. Для газлифта PIPESIM предлагает расчеты с учетом размещения новых и установленных мандрелей газлифтных клапанов, а также выбор дизайнера клапана для определения оптимальной глубины его установки с использованием стандартизованных методов проектирования газлифта. PIPESIM также включает базу данных производителей клапанов, предоставляя наиболее точную информацию для принятия лучших решений. База данных производителей ЭЦН, содержащаяся в PIPESIM, обеспечивает информацию при выборе

насоса. При необходимости в базу данных могут быть добавлены новые насосы. PIPESIM использует передовые методы для выполнения проектирования и диагностики газлифтных скважин.

Поиск причин, ограничивающих потенциал работы скважин, – еще одна важная задача, которую также позволяет решить PIPESIM. Симулятор определяет места, подверженные коррозии, и, в частности, прогнозирует скорость коррозии CO₂. Модель коррозии De Waard рассчитывает скорость коррозии, вызванной наличием CO₂, растворенного в воде. Концентрация CO₂ определяется из свойств жидкости (модель черной нефти или композиционная). В PIPESIM инженеры могут также моделировать эрозию, чтобы выбрать необходимое оборудование и материалы. Методы моделирования эрозии в PIPESIM включают API 14E и модели Салама. Предел скорости эрозии рассчитывается на основе сложившихся условий потока и представляется в виде отношения к средней скорости флюида. Значения скорости эрозии, равные единице или больше, указывают на степень риска. Кроме того, модель Салама предсказывает величину материального ущерба в результате эрозии для жидкостей с содержанием песка.

Одной из причин, снижающих потенциал работы скважин, могут стать отложения АСПО, вследствие чего уменьшается приток нефти, увеличивается нагрузка на станки-качалки, что, в свою очередь, может привести к обрыву штанг, повышению расхода энергии, увеличению утечек через плунжер и клапан и, соответственно, уменьшению коэффициента подачи. Также происходит уменьшение производительности ЭЦН, увеличение затрат энергии, перегрев электродвигателя. Пользователи могут создавать профиль добычи, наложенный на фазовую диаграмму, для прогнозирования возникновения асфальтенов и мест их образования.

Для определения наличия и мест появления асфальтенов в отдельных скважинах или сети выводится отчет по температурам образования и/или температурам переохлаждения асфальтенов.

Высокая вязкость жидкости в результате образования эмульсии может вызвать большие потери давления в скважинах и промысловых трубопроводах. В PIPESIM доступно несколько зависимостей для расчета эмульсий, в том числе Woelfin, Brinkman, Vand, Richardson, Leviton и Leighton. Точка инверсии, определяющая непрерывную фазу, может быть определена пользователем или рассчитана по уравнению Brauner – Ullman.

Еще один способ оптимизировать добычу на существующих скважинах – применение метода «анализа чувствительности». Узловой анализ широко известен как метод оценки производительности скважин и имеет большое значение в понимании поведения системы в целом. Узловой анализ в PIPESIM позволяет построить графики притока-оттока в любой точке системы и выполнить анализ чувствительности по любой системной переменной, обеспечивая понимание того, где имеются возможности увеличения дебита. В дополнение к узловому анализу PIPESIM предлагает целый ряд других опций для широкого круга рабочих процессов скважинного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Симулятор PIPESIM – это уникальный продукт. В одной программной среде возможно и проектировать скважину и трубопроводы, и моделировать условия бесперебойного потока для получения самых точных производственных решений среди доступных на рынке. Функционал моделирования сетей разработан для проектирования сетей практически любого размера

и топологии, в том числе имеющих сложную структуру закольцованной системы и пересечений. С помощью моделирования всей производственной системы или системы нагнетания в виде сети можно должным образом учесть взаимозависимость скважин и наземного оборудования и определить пропускную способность всей системы. Еще одно немаловажное достоинство PIPESIM – новые возможности для самообучения, открывающиеся перед специалистами.

Остается добавить, что PIPESIM продолжает совершенствоваться и непрерывно обновляется, используя научные знания в трех ключевых направлениях моделирования потока – мультифазный поток, теплообмен и поведение флюида, а также инновации в информационных технологиях и технологиях нефтегазовой отрасли. Выпуская версию PIPESIM 2019.1, компания Schlumberger продолжает придерживаться выбранного пути развития – внедрения инноваций и улучшений для решения ваших задач. Ключевая новинка данной версии – оптимизатор сети Network Optimizer Task.

PIPESIM 2019 – первая версия нового поколения, имеющая оптимизатор сети, способный выполнять подбор газлифта, рабочей частоты ЭЦН или винтовых насосов и подбор диаметров штуцеров в процессе поиска максимума или минимума заданной целевой функции. Решение задачи может выполняться с учетом различных глобальных и/или локальных ограничений, таких как ограничения на скважины, трубопроводы, терминальные узлы. При этом ограничения могут иметь индивидуальный характер, а также применяться к группе объектов. Алгоритм оптимизации разработан исследовательским центром Schlumberger Doll-Research (Cambridge, MA) и успешно применен для оптимизации сети с ограничениями на тысячи скважин.