

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(21) 202393251 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2024.05.16

(51) Int. Cl. G06F 30/28 (2020.01)
G06F 111/10 (2020.01)
G06F 113/14 (2020.01)

(22) Дата подачи заявки
2022.06.09

(54) СПОСОБ И ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ
РАЗМЕРОВ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ
МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ

(31) 20210752

(72) Изобретатель:

(32) 2021.06.10

Хьёлос Йорн, Ескеруд Смит Ивар,
Ниис Джонатан (NO)

(33) NO

(86) PCT/EP2022/065688

(74) Представитель:

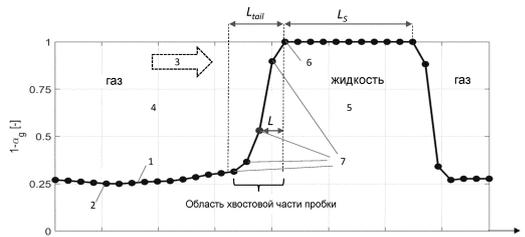
(87) WO 2022/258750 2022.12.15

Нагорных И.М. (RU)

(71) Заявитель:

ЛЕДАФЛОУ ТЕКНОЛОДЖИС ДА
(NO)

(57) Это изобретение относится к компьютерно-реализуемому способу для прогнозирования поведения текучей среды в трубопроводных транспортных системах для транспортировки многофазных потоков, включающих в себя пробковые потоки, который заставляет одномерные CFD-модели прогнозировать скорость пузыря Тейлора, равную предварительно заданной скорости пузыря Тейлора, которая известна как реалистичная. Применение 1D CFD-модели для нахождения предварительно заданной скорости пузыря Тейлора осуществляется посредством введения силового члена в уравнение импульса для газовой фазы на вершине хвостовой части пробки и вблизи нее, и который пропорционален разнице между скоростью пузыря Тейлора, спрогнозированной CFD-моделью, и предварительно заданной скоростью пузыря Тейлора. Изобретение дополнительно относится к автономной системе, применяющей компьютерно-реализуемый способ.



A1

202393251

202393251

A1

Способ и инструмент для планирования и определения размеров подводных трубопроводных транспортных систем для многофазных потоков

Область техники, к которой относится изобретение

Это изобретение относится к компьютерно-реализуемому способу для прогнозирования поведения текучей среды в трубопроводных транспортных системах для транспортировки многофазных потоков, которые могут включать в себя гидродинамические пробковые потоки. Изобретение дополнительно относится к одномерной CFD-модели, которая может обеспечивать более реалистичные прогнозы скорости пузырей Тейлора.

Предпосылки создания изобретения

Нефтяная промышленность находится под постоянным давлением минимизировать воздействие новых разработок на окружающую среду и при этом оставаться прибыльной даже в условиях падения цен на нефть. Ключевым элементом для достижения этих целей было привязывание новых скважин к существующей инфраструктуре вместо строительства новых установок для каждой разработки. Эта стратегия доказала успешность, но новые запасы углеводородов обнаруживаются на все большем расстоянии от существующих перерабатывающих установок и в некоторых случаях может быть необходимо транспортировать непереработанные текучие среды на сотни километров или более.

Транспортировка многофазных текучих сред на такие расстояния является сложной по нескольким причинам, и одним из основных препятствий является риск образования длинных пробок. В частности, известно, что жидкостные пробки имеют склонность расти при прохождении больших расстояний, и это необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации систем добычи. Способность правильно прогнозировать характеристики пробкового потока имеет большое значение как на этапе проектирования установок добычи углеводородов, так и во время эксплуатации.

На этапе проектирования размеры пробок и их частота являются важными параметрами для проектирования размера приемных установок, таких как пробкоуловитель/пробкоотделитель. В этом случае недостаточный коэффициент запаса может приводить к серьезным эксплуатационным проблемам, которые ограничивают срок службы системы добычи, а также к частым нештатным

остановкам со значительным снижением добычи. В дополнение, силы, воздействующие на изгибы труб и пролеты трубопровода, чувствительны к характеристикам образования пробок. В частности, пробки вызывают изменения нагрузки и последующие вибрации, которые сокращают срок службы фитингов труб и других уязвимых компонентов. Когда месторождение эксплуатируется, способность прогнозировать характеристики пробок важна для исследования влияния возможных действий по уменьшению воздействия, таких как надводное дросселирование или применение газлифта, на уменьшение интенсивности образования пробок.

Средняя задержка жидкости и падение давления также важны: недооценка падения давления может приводить к заниженному диаметру трубопровода и тем самым к уменьшенной производительности во время этапа добычи. С другой стороны, преувеличенная оценка падения давления может приводить к завышению диаметра трубопровода, что может создавать нестабильности потока и ухудшать пригодность системы к эксплуатации. Эти вопросы жизненно важны для экономии и осуществимости всех систем добычи углеводородов, и необходимы точные имитационные модели для прогнозирования последствий разных конструкций и подходов.

Уровень техники

Моделирование газожидкостного потока в трубопроводе и особенно способность прогнозировать пробковый поток с помощью моделей вычислительной гидродинамики (CFD) широко исследовались как в нефтегазовой отрасли, так и в отрасли ядерных реакторов.

Компьютерные коды программного обеспечения CFD обычно состоят из трех основных элементов: (i) препроцессора, (ii) решателя и (iii) постпроцессора. Элемент препроцессора относится к определению/вводу проблемы потока текучей среды, подлежащей имитации. Элемент постпроцессора относится к выходным данным имитации/выводу результатов имитации и т.д. Элемент решателя относится к численному решению законов природы, определяющих явления переноса, конвекцию, диффузию и, если присутствуют, любые источниковые члены.

Определяющие управления потока текучей среды представляют собой математические формулировки, выражающие законы сохранения физики для обеспечения сохранения массы, импульса и энергии текучей среды. Кроме того,

эти уравнения нелинейны и связаны, что означает, что, например, уравнение импульса зависит от решения уравнения массы и наоборот. Текучая среда обрабатывается как непрерывная, когда ее поведение описывается с точки зрения макроскопических свойств, таких как скорость, давление, плотность и температура.

При имитации трубопровода нефтяного месторождения использование обычных двух- или трехмерных CFD-кодов обычно невозможно из-за физических размеров/длины труб, и на завершение имитации могут уходить годы. В связи с этим моделирование длинных трубопроводов с помощью численных моделей вычислительной гидродинамики всегда выполняется с использованием одномерных (1D) усредненных уравнений сохранения для достижения приемлемого времени имитации. В таких 1D моделях уравнения усредняются по ширине и высоте трубы, в результате чего получается одномерная модель, которая в вычислительном отношении намного быстрее и может имитировать трубопровод в пределах разумных временных рамок. Такие модели в литературе часто называются двухжидкостными или трехжидкостными моделями. Однако процедура усреднения отбрасывает члены в уравнениях переноса, что делает 1D модель более приближенной, чем исходные определяющие уравнения. Это делает 1D модель зависимой от эмпирических корреляций, подобранных на основе экспериментальных данных и/или дополнительных компонентов модели, для получения хороших результатов.

Наиболее широко используемый подход для моделирования пробкового потока заключается в применении относительно крупной сетки вместе с подсеточной моделью, которая обрабатывает пробковый поток усредненным образом, предполагая локально установившийся полностью развившийся поток. Этот тип моделирования часто называется подходом Модели элементарной ячейки (Unit-Cell Model, UCM) на основе концепции, впервые представленной Dukler и Hubbard [1]. Эта модель может прогнозировать как задержку жидкости, так и падение давления, но способна давать только среднюю долю пробок в трубе без информации о длине пробок или частоте пробок.

Альтернативный подход для моделирования пробкового потока, обычно называемый «улавливание пробок», впервые был предложен Issa [2]. При улавливании пробок 1D уравнения многофазного потока решаются на относительно мелкой сетке, что исключает необходимость в подсеточной модели, используемой в подходе UCM. При этом подходе волны растут естественным

образом из нестабильностей и развиваются в пробки без необходимости специальных моделей инициирования.

Один из наиболее важных аспектов моделирования пробкового потока заключается в точном прогнозировании скорости больших пузырей, разделяющих пробки (пузырей Тейлора). Скорость пузыря Тейлора определяет, сколько жидкости теряют пробки в хвостовой части пробки, а также главным образом определяет среднюю задержку жидкости в пробковом потоке. Таким образом, слишком большая скорость приводит к уменьшению длины пробок (возможно, исчезанию), тогда как слишком низкая скорость приводит к росту пробок. Другими словами, скорость пузыря Тейлора представляет собой параметр, который имеет большое влияние на длину пробок.

Sanderse и др. [3] показали, что невозможно получать правильную скорость дрейфа пузыря Тейлора с помощью обычных уравнений 1D модели без введения корректировки. Причина этого состоит в том, что скорость пузыря Тейлора является продуктом механизмов, которые по своей сути являются трехмерными, и некоторые из связанных с ними эффектов неизбежно теряются, когда уравнения усредняются до 1D.

Однако в литературе известны несколько аналитически сформулированных моделей, для обеспечения реалистичных прогнозов скоростей пузырей Тейлора. Все такие модели обычно основаны на одном и том же принципе. Примеры этой модели и различных улучшений включают в себя Bendiksen [4], Dumitrescu [5], Gokcal [6], Jeyachandra и др. [7] и Viana и др. [8].

Задача изобретения

Основной задачей изобретения является обеспечение компьютерно-реализуемого способа для прогнозирования поведения текучей среды многофазного потока в трубопроводной транспортной системе с помощью 1D CFD-модели.

Дополнительной задачей изобретения является обеспечение компьютерно-реализуемого способа для прогнозирования поведения текучей среды многофазного потока в трубопроводной транспортной системе, включающего в себя гидродинамические пробковые потоки, с помощью 1D CFD-модели, обеспечивающей более точные скорости пузырей Тейлора.

Другой задачей изобретения является обеспечение компьютерно-реализуемого способа для проектирования транспортных систем для многофазных потоков текучей среды.

Дополнительной задачей изобретения является компьютерно-реализуемый инструмент имитации для проектирования/оптимизации и/или поиска и устранения проблем трубопроводной транспортной системы для многофазных потоков текучей среды.

Описание изобретения

Изобретение основано на осознании того, что известные недостатки одномерных CFD-моделей при прогнозировании скоростей пузыря Тейлора можно преодолевать, заставляя CFD-модель прогнозировать скорость пузыря Тейлора, равную предварительно заданной скорости пузыря Тейлора, вычисленной на основе, например, аналитически сформулированной модели скорости пузыря Тейлора, подобной упомянутым ранее или определенной другим способом. Применение CFD-модели для нахождения предварительно заданной скорости пузыря Тейлора согласно изобретению осуществляется посредством введения силового члена в уравнение импульса для газовой фазы на вершине хвостовой части пробки и вблизи нее, который пропорционален разнице между скоростью пузыря Тейлора, спрогнозированной CFD-моделью, и предварительно заданной скоростью пузыря Тейлора.

В общем уравнение импульса газа может быть упрощено и записано следующим образом:

$$\frac{\partial(M_g U_g)}{\partial t} + FRIC_g + GRAV_g + CONV_g + \dots = 0 \quad (1)$$

где M_g - масса газовой фазы, U_g - скорость газовой фазы, $FRIC_g$ - фрикционные члены газовой фазы, $GRAV_g$ - гравитационные члены газовой фазы, а $CONV_g$ - конвективные члены газовой фазы. Фрикционные и конвективные члены зависят от массы и скорости.

Уравнение импульса газа может, например, быть дискретизировано, чтобы быть линейно зависимым от новой скорости газа, как показано в ур. (2):

$$\frac{M_g^{n+1} U_g^{n+1} - M_g^n U_g^n}{\Delta t} + FRIC_g(U_g^{n+1}) + GRAV_g + CONV_g(U_g^{n+1}) + \dots = 0 \quad (2)$$

где U_g^{n+1} - новая скорость газа на следующем временном шаге $n+1$, а U_g^n - скорость газа на текущем временном шаге n . И аналогично, M_g^{n+1} - новая масса газовой фазы на следующем временном шаге $n+1$, а M_g^n - масса газовой фазы на текущем временном шаге n .

Дискретизированное уравнение импульса может быть преобразовано и

упрощено посредством сбора всех членов, умножаемых на $n+1$ -ю скорость газа, в левой части, а остальных членов в правой части:

$$A_g \cdot U_g^{n+1} = B_g \quad (3)$$

причем член A_g содержит новую массу газа, $\frac{M_g^{n+1}}{\Delta t}$, и коэффициенты от трения и конвекции. Член B_g содержит члены явной части производной по времени, $\left(\frac{M_g^n U_g^n}{\Delta t}\right)$, и гравитационный член.

Эта же процедура может быть использована, когда в уравнение импульса газа вводится силовой член, определяемый как $F(U_g - U_b)$, где F - коэффициент силы, U_g - спрогнозированная (с помощью CFD-модели) скорость пузыря Тейлора, а U_b - предварительно заданная скорость пузыря Тейлора. Тогда уравнение импульса газа имеет вид:

$$\frac{M_g^{n+1} U_g^{n+1} - M_g^n U_g^n}{\Delta t} + FRIC_g(U_g^{n+1}) + GRAV_g + CONV_g(U_g^{n+1}) + F(U_g^{n+1} - U_b) + \dots = 0 \quad (4)$$

Оно может быть преобразовано и упрощено для чтения:

$$(A_g + F) \cdot U_g^{n+1} = B_g + F U_b \quad (5)$$

Когда коэффициент F становится большим, т.е. $F \gg A_g$ и $F \gg B_g/U_b$, ур. (5) может быть приблизительно выражено как:

$$F \cdot U_g^{n+1} = F U_b \quad (6)$$

Таким образом, большое значение коэффициента силы F приводит к тому, что спрогнозированная скорость пузыря Тейлора приближается к предварительно заданной скорости пузыря Тейлора. Специалисту в данной области техники очевидно, что переменные M_g^{n+1} , Δx , U_g^{n+1} , F , A_g и B_g оцениваются локально, т.е. для каждого i -го конечного контрольного объема области вычислений. Однако индекс i опущен для упрощения терминологии.

Чтобы сохранять импульс при CFD-имитации, член силы аналогичного размера и противоположного направления добавлен в уравнение импульса для соседней жидкой фазы, т.е. жидкой фазы, находящейся в контакте с газом в том же контрольном объеме:

$$\frac{\partial(M_l U_l)}{\partial t} + FRIC_l + GRAV_l + CONV_l - F(U_g - U_b) + \dots = 0 \quad (7)$$

где M_l - масса газовой фазы, U_g - скорость газовой фазы, $FRIC_l$ - фрикционные члены жидкой фазы, $GRAV_l$ - гравитационные члены жидкой фазы, а $CONV_l$ - конвективные члены жидкой фазы. При применении такой же схемы дискретизации и такого же упрощения и преобразования, что и для уравнения

импульса газа, уравнение импульса для жидкости, ур. (7), может быть получено как:

$$A_l U_l^{n+1} - F U_g^{n+1} = B_l - F U_b \quad (8)$$

где член A_l содержит новую массу жидкости и коэффициенты как трения, так и конвекции. Член B_l содержит члены из явной части производной по времени и гравитационный член.

Таким образом, в первом аспекте изобретение относится к компьютерно-реализуемому способу для прогнозирования поведения текучей среды многофазного потока в трубопроводной транспортной системе, где поток содержит по меньшей мере одну газовую фазу и одну жидкую фазу, причем способ содержит:

применение одномерной (1D) модели вычислительной гидродинамики (CFD), описывающей геометрию интересующей секции трубопроводной транспортной системы и многофазного потока, текущего в ней, и

решение 1D CFD-модели для имитации поведения текучей среды многофазного потока в интересующей секции трубопроводной транспортной системы,

причем

1D CFD-модель применяет метод конечных объемов для решения модели, причем геометрия интересующей секции трубопроводной транспортной системы определяется как область вычислений, продолжающаяся вдоль оси, представленной декартовой координатой x , и разделенная на набор N , где N - целое положительное число, не перекрывающихся конечных контрольных объемов, разделенных внутренней поверхностью между смежными конечными контрольными объемами,

отличающийся тем, что 1D CFD-модель выполнена с возможностью:

поиска и идентификации вершин хвостовых частей пробок в области вычислений, где вершина хвостовой части пробки определяется как конечный контрольный объем, имеющий долю газа менее 0,02, и расположенный вверх по потоку соседний конечный контрольный объем с долей газа более 0,02, и,

для каждой идентифицированной вершины хвостовой части пробки, определения области хвостовой части пробки, состоящей из вершины хвостовой части пробки и каждого конечного контрольного объема, лежащего в пределах расстояния L_{tail} , продолжающегося в направлении вверх по потоку от вершины

хвостовой части пробки, где расстояние $L_{tail} = \Delta x \left(4 + \frac{1}{\Delta x^*}\right)$, где $\Delta x^* = 1$, если $\frac{\Delta x}{D} \leq 15$, или $\Delta x^* = e^{\frac{\Delta x}{15D}} - 1$, если $\frac{\Delta x}{D} > 15$, а Δx - длина ячейки конечного контрольного объема,

и дополнительно отличающийся тем, что

1D CFD-модель для каждой идентифицированной области хвостовой части пробки дополнительно выполнена с возможностью применения корректировки хвостовой части пробки, содержащей:

корректировку скорости газа для каждого конечного контрольного объема области хвостовой части пробки путем добавления в уравнение импульса газа силового члена, $F(U_g^{n+1} - U_b) \cdot W$, где F - коэффициент силы, U_g^{n+1} - скорость газа на следующем временном шаге $n+1$, применяемая CFD-моделью, U_b - предварительно заданная скорость пузыря Тейлора, W - весовая функция, имеющая значение 1 для конечного контрольного объема на вершине хвостовой части пробки, и значение между 0 и 1 для конечных контрольных объемов, лежащих в пределах расстояния L_{tail} , и где $F \geq 10 \cdot \max(|A_g|, |B_g/U_b|)$, где A_g и B_g получаются путем преобразования адаптированного уравнения импульса газа в форму:

$$(A_g + F \cdot W) \cdot U_g^{n+1} = B_g + F \cdot W \cdot U_b$$

и

применение корректировки скорости жидкости для каждого конечного контрольного объема области хвостовой части пробки для соседней жидкой фазы текучей среды в контакте с газовой фазой многофазного потока путем вычитания из уравнения импульса для соседней жидкой фазы силового члена, $F(U_g^{n+1} - U_b) \cdot W$.

Настоящее изобретение не ограничивается каким-либо выбором схемы дискретизации или алгоритма численного решения за исключением того, что 1D CFD-модель должна применять подход метода конечных объемов, а силовой член неявно представлен в скорости. Уравнение импульса газа может быть дискретизировано многими способами, включая полностью неявные схемы как по массе, так и по скорости, полностью явные схемы или их комбинацию.

Как использовано в настоящем документе, термин «трубопроводная транспортная система» охватывает все компоненты транспортной системы, необходимой для транспортировки текучей среды, включая сегменты

трубопроводов, разветвления, соединения, клапаны, насосы, источники, стоки и т.д. Пример трубопроводной транспортной системы для жидкостей, производимых в нефтегазодобыче, показан на Фигуре 1, на которой схематически проиллюстрирован примерный вариант выполнения такой системы транспортировки. Этот примерный вариант выполнения содержит множество хвостовиков/трубопроводов (2), соединяющих добывающую скважину (1) с близлежащим узлом-спутником (3), который собирает добытую текучую среду в области и передает добытую текучую среду по трубопроводу-спутнику (4) в общий узел (5). Примерный вариант выполнения содержит четыре узла-спутника (3), каждый из которых соединен с общим (5) посредством трубопровода-спутника (4). Общий узел (5) передает добытую текучую среду в перерабатывающую установку, расположенную в море на поверхности моря, с помощью райзера (не показан в этом варианте выполнения), или в береговую производственную установку по трубопроводу транспортировки текучей среды (6). Транспортная система обычно включает в себя один или более насосов текучей среды (7) для обеспечения необходимого давления потока для перемещения текучих сред через транспортную систему. Вышеприведенный примерный вариант выполнения не должен интерпретироваться узко. Трубопроводная транспортная система может иметь любую возможную конфигурацию: от единственного трубопровода для транспортировки текучей среды до взаимно соединенных сетевых трубопроводов для транспортировки текучей среды на, например, заводах химической промышленности, для соединения морских добывающих установок с береговыми установками приема добытой текучей среды и т.д.

Как использовано в настоящем документе, термин «предварительно заданная скорость пузыря Тейлора» относится к опорному значению, при котором выполнена адаптированная 1D CFD-модель согласно первому аспекту изобретения посредством адаптации прогнозирования. Предварительно заданная скорость пузыря Тейлора может быть получена любым подходящим способом, известным специалисту в данной области техники, например, путем эмпирического определения скоростей пузыря Тейлора, прогнозирования предварительно заданных скоростей пузыря Тейлора с помощью прямых имитаций Навье-Стокса или прогнозирования предварительно заданной скорости пузыря Тейлора с помощью аналитически сформулированной модели из литературы, такой как, например, модели Bendiksen [4], Dumitrescu [5], Gokcal [6], Jeyachandra и др. [7] или Viana и др. [8].

Обнаружено, что адаптированная 1D CFD-модель согласно первому аспекту изобретения может в некоторых случаях становиться неустойчивой, если коэффициент силы становится слишком большим или если его значение меняется слишком быстро от ячейки к ячейке. Таким образом, в примерном варианте выполнения 1D CFD-модели согласно первому аспекту изобретения для получения плавной и уменьшающейся силы в области хвостовой части пробки весовая функция W может быть определена для каждого конечного контрольного объема области хвостовой части пробки посредством соотношения:

$$W = \text{MAX} \left(0; 0,5 \left(1 - \tanh \left(\frac{6L}{5 \frac{\Delta x}{D}} - 3 - \frac{1}{\Delta x^*} \right) \right) \right) \cdot \Psi(Fr) \quad (9)$$

где функция $\Psi(Fr)$ представляет собой:

$$\Psi(Fr) = 0,5(1 + \tanh(10(Fr - 0,5))) \quad (10)$$

число Фруда, Fr , представляет собой:

$$Fr = \frac{|U_{mix}|}{\sqrt{gD \cos(\theta) \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} \right)}} \quad (11)$$

и где L - расстояние от i -го конечного контрольного объема области хвостовой части пробки до вершины хвостовой части пробки, g - гравитация, U_{mix} - общий объемный расход, деленный на площадь поперечного сечения трубы, θ - угол трубы, измеренный относительно горизонтальной плоскости, ρ_g - плотность газа, а ρ_l - среднее объемное значение плотностей одной или более жидкостей, находящихся в конечном контрольном объеме. Весовой коэффициент W уравнения (9) спроектирован так, чтобы он был равен 1 на вершине хвостовой части пробки и стремился к нулю на расположенном вверх по потоку конце области хвостовой части пробки (от пробки).

Как использовано в настоящем документе, термин «область хвостовой части пробки» представляет собой подобласть области вычислений, охватывающую все конечные контрольные объемы, лежащие от вершины хвостовой части пробки и на расстоянии L_{tail} в направлении вверх по потоку, т.е. расстояние L_{tail} продолжается в направлении, противоположном направлению потока. Таким образом, термин «направление вниз по потоку», как использовано в настоящем документе, означает направление по направлению потока, тогда как термин «направление вверх по потоку», как использовано в настоящем документе, означает направление в противоположном направлении направлению

потока.

Фигура 2 представляет собой графическое изображение, на котором проиллюстрирован пример пробкового потока, включающего в себя жидкую и газовую фазу внутри секции трубопровода. Сплошная линия, обозначенная ссылочным номером 1, представляет собой крупномасштабную границу раздела, отделяющую непрерывную газовую фазу от непрерывной жидкой фазы многофазного потока. Положение крупномасштабной границы раздела масштабировано как $1 - \alpha$, где α - доля газа. Каждая точка 2 на линии 1 обозначает центральное положение на декартовой координате x конечных контрольных объемов, применяемых 1D CFD-моделью сегмента трубопровода. Пунктирная стрелка 3 показывает направление многофазного потока. Как видно на Фигуре, непрерывная газовая фаза/пузырь Тейлора 4 давит на пробку 5 из жидкости, которая заполняет все поперечное сечение трубы.

Конечный контрольный объем, обозначенный ссылочным номером 6, лежит на вершине хвостовой части пробки, т.е. заднем (расположенном вверх по потоку) конце жидкостной пробки. Расстояние L_{tail} продолжается в направлении вверх по потоку (т.е. в направлении, противоположном направлению потока), которое в этом в примерном варианте выполнения охватывает 4 соседних конечных контрольных объема, обозначенных ссылочной позицией 7. Таким образом, область хвостовой части пробки в этом примерном варианте выполнения включает в себя конечный контрольный объем 6 на вершине хвостовой части пробки и его 4 ближайших соседних конечных контрольных объема 7 в направлении вверх по потоку.

Из литературы хорошо известно, что аналитически сформулированные модели скорости пузыря Тейлора меньше подходят для коротких пробок. Для коротких пробок возмущения с передней части пробки будут распространяться через пробку и влиять на профиль скорости в носовой части пузыря Тейлора позади нее, заставляя носовую часть пузыря Тейлора ускоряться. Это было подтверждено экспериментально в нескольких исследованиях и было предложено много корреляций для увеличения скорости пузыря Тейлора как функции длины пробки. Этот эффект следа будет заставлять более короткие пробки (обычно $<10 D$ по длине) терять больше жидкости в хвостовой части пробки, чем более длинные пробки, и этот процесс приводит к тому, что короткие пробки исчезают и превращаются в большие волны. Преобладающие волны, которые имеют склонность двигаться медленнее, чем пробки, затем поглощаются находящимися

сзади пробками, которые впоследствии увеличиваются в длину. Авторы настоящего изобретения обнаружили, что эффект следа может оказывать значительное влияние на прогнозируемые длины пробок. Без корректировки эффекта следа преобладающее распределение длин пробок в прогнозируемом потоке может содержать слишком много коротких пробок и слишком мало больших пробок, что в некоторых случаях может приводить к проблемам сходимости сетки. В частности, при доработке вычислительной сетки все более и более короткие пробки устраняются, и без эффекта следа для исключения малых пробок результатом будет частота пробок, главным образом зависящая от размера сетки.

Таким образом, в примерном варианте выполнения изобретение согласно первому аспекту изобретения может дополнительно быть выполнено с возможностью включения в себя корректировки эффекта следа, где заданная скорость пузыря Тейлора регулируется как функция длины пробки, L_S , такой как, например, корректировка, разработанная Cook & Behnia [9], которая выглядит следующим образом:

$$U_b = U_{b,\infty} \left(1 + 0,56e^{-0,46\frac{L_S}{D}} \right) \quad (13)$$

где $U_{b,\infty}$ - скорость пузыря Тейлора, который толкает длинную пробку, на которую не влияет эффект следа, L_S - длина пробки перед пузырем Тейлора, а D - внутренний диаметр трубы.

В примерном варианте выполнения способа согласно первому аспекту изобретения 1D CFD-модель может применять подход улавливания пробок, при котором 1D уравнения многофазных потоков решаются на сетке с $\Delta x \leq 10 \cdot D$, где Δx - длина ячеек конечного контрольного объема интересующей секции, а D - внутренний диаметр трубопровода интересующей секции.

Во втором аспекте изобретение относится к способу для оптимизации конструкции трубопроводной системы транспортировки текучей среды для транспортировки многофазного потока текучей среды, причем способ содержит:

- подготовку по меньшей мере двух разных конструкций системы транспортировки текучей среды,
- применение компьютерно-реализуемого способа согласно первому аспекту изобретения для прогнозирования поведения текучей среды в каждой из по меньшей мере двух разных конструкций и
- применение спрогнозированного поведения текучей среды для

определения оптимизированной конструкции системы транспортировки текучей среды.

Оптимизация конструкции системы транспортировки может принимать во внимание один или более таких факторов, как диаметр трубопровода, траектория трубопровода на местности, количество насосов для поддержания давления, их местоположение и эффект повышения давления, количество дроссельных клапанов, их местоположение и эффект уменьшения объема потока и т.д., с целью экономии капитальных вложений и эксплуатационных затрат путем идентификации оптимальных физических размеров и/или траектории на местности труб транспортных систем без ущерба для стабильности поведения текучей среды и пропускной способности. Кроме того, оптимизация конструкции трубопроводной системы транспортировки текучей среды в примерном варианте выполнения может применять симитированные размеры пробок и частоту пробок для оптимизации размера приемных установок, таких как пробкоуловитель и/или пробкоотделитель и т.д. Оптимизация конструкции трубопроводной системы транспортировки текучей среды в дополнительном примерном варианте выполнения также может применять симитированные размеры пробок и частоту пробок для оценки сил, воздействующих на изгибы труб и пролеты трубопровода в трубопроводной системе транспортировки текучей среды.

В третьем аспекте изобретение относится к способу для поиска и устранения проблем потока во время работы трубопроводной системы транспортировки текучей среды для транспортировки многофазного потока текучей среды, причем способ содержит:

- применение компьютерно-реализуемого способа согласно первому аспекту изобретения, в который загружена область вычислений, характерная для транспортной системы, имеющей проблемы с потоком, и входные данные характеристик потока в системе транспортировки, для прогнозирования влияния на поведение текучей среды в транспортной системе возможных действий по уменьшению воздействия и

- применение спрогнозированных поведений текучей среды для определения, какое действие по уменьшению воздействия должно быть физически реализовано в транспортной системе, имеющей проблемы с потоком.

Действиями по уменьшению воздействия могут быть регулирование объемов потока в транспортной системе, надводное дросселирование, применение газлифта и другие.

В четвертом аспекте изобретение относится к компьютерной программе, содержащей инструкции по обработке, которая заставляет компьютер выполнять способ согласно любому из первого-третьего аспектов изобретения, когда инструкции исполняются устройством обработки в компьютере.

В пятом аспекте изобретение относится к компьютеру, содержащему устройство обработки и память компьютера, которая хранит компьютерную программу, как изложено в четвертом аспекте.

В шестом аспекте изобретение относится к автономной системе управления потоком (100), содержащей:

- блок имитации потока (30),
- конфигурацию датчиков, содержащую по меньшей мере первый датчик (51), расположенный на расположенном вверх по потоку конце (11), и второй датчик (51), расположенный на расположенном вниз по потоку конце (12) трубопроводной транспортной системы (10), и измеряющую один или более отличительных параметров потока многофазной текучей среды, текущей через трубопроводную транспортную систему (10),
- конфигурацию актуаторов, содержащую по меньшей мере один актуатор (61), выполненный с возможностью регулирования потока текучей среды через трубопроводную транспортную систему (10), и
- блок управления (20), выполненный с возможностью:
 - приема сигналов (53, 54) от конфигурации датчиков, измеряющей один или более отличительных параметров потока, и преобразования сигналов в одно или более граничных условий (21), передаваемых в блок имитации потока (30), и
 - приема результатов имитации (32) от блока имитации потока (30) и преобразования результатов имитации в установочные значения (22), передаваемые в актуатор(ы) (61) конфигурации актуаторов, причем
- блок имитации потока (30) содержит компьютер, в который загружено программное обеспечение, которое при исполнении выполняет компьютерно-реализуемый способ, имитирующий поведение текучей среды многофазного потока, текущего в трубопроводной транспортной системе (10), с граничным(и) условием(ями) (21) от блока управления (20), отличающейся тем, что
- программное обеспечение компьютера блока имитации потока (30)

представляет собой компьютерную программу согласно четвертому аспекту изобретения.

Конфигурация примерного варианта выполнения системы управления потоком согласно изобретению схематически проиллюстрирована на схеме, показанной на Фигуре 5. Трубопроводная транспортная система, управляемая системой управления потоком 100, схематически показана на Фигуре в виде рамки 10, имеющей расположенный вверх по потоку конец 11, принимающий текучую среду для транспортировки через транспортную систему до расположенного вниз по потоку конца 12, где текучая среда доставляется в установку приема текучей среды. Система управления потоком содержит дополнительный блок управления 20, блок имитации потока 30, конфигурацию датчиков, содержащую по меньшей мере первый датчик 51, расположенный на расположенном вверх по потоку конце 11, и второй датчик 52, расположенный на расположенном вниз по потоку конце 12 трубопроводной транспортной системы 10, и конфигурацию актуаторов, содержащую по меньшей мере один актуатор 61, выполненный с возможностью регулирования сквозного потока одной или более фаз текучей среды многофазного потока.

В другом примерном варианте выполнения системы управления потоком согласно изобретению система управления потоком дополнительно содержит второй актуатор 62, расположенный на расположенном вниз по потоку конце 12, и/или третий актуатор (не показан на Фигуре), расположенный в любом месте между расположенном вверх по потоку 11 и расположенный вниз по потоку 12 концами трубопроводной транспортной системы 10. В этом варианте выполнения установочное значение для второго актуатора 62 передается от блока управления в виде сигнала 23, а установочное значение для третьего актуатора передается от блока управления в виде сигнала 24. В одном варианте выполнения актуатор 61, 62 конфигурации актуаторов представляет собой управляющий клапан, барабанный сепаратор, компрессор, газовый инжектор или насос.

В одном варианте выполнения блок управления 20 может представлять собой Распределенную систему управления, Программируемый логический контроллер, Граничный шлюз, систему SCADA, систему Historian или Базу данных временных рядов, реализуемые для покрытия уровней автоматизации 0, 1, и 2 согласно стандарту: ANSI/ISA-95.00.01-2010 (IEC 62264-1 Mod) Enterprise-Control System Integration – Part 1: Models and Terminology (Интеграция системы управления предприятием - Часть 1: Модели и терминология).

Блок управления 20 принимает сигналы датчиков 53, 54 от конфигурации датчиков, которые обычно представляют собой электрические сигналы, и преобразует их в один или более измеренных параметров потока, таких как, например, скорость потока одной или более фаз текучей среды, давление, температура, плотность одной или более фаз текучей среды, объемная или массовая доля одной или более фаз текучей среды и т.д. Эти измеренные один или более параметров потока передаются в блок имитации потока (30) и применяются в качестве граничного(ых) условия(й) в имитации многофазного потока.

Компьютерно-реализуемый способ для прогнозирования поведения текучей среды может в некоторых вариантах выполнения требовать информации соотношений газовой и жидкой фаз и температуры многофазного потока, входящего в транспортную систему на ее расположенном вверх по потоку конце, для прогнозирования поведения текучей среды. В некоторых применениях расходы и соответственно отношения газовой и жидкой фаз потока, входящего в трубопроводную транспортную систему, являются постоянными или практически постоянными. В таких случаях информация соотношений газовой и жидкой фаз может быть введена в качестве входной переменной для компьютерно-реализуемого способа. Таким образом, в одном варианте выполнения первый датчик 51 конфигурации датчиков системы управления потоком содержит по меньшей мере датчик температуры, расположенный на расположенном вверх по потоку конце 11 трубопроводной транспортной системы 10. В других применениях отношения газовой и жидкой фаз могут изменяться. Таким образом, в одном варианте выполнения первый датчик 51 конфигурации датчиков системы управления потоком содержит по меньшей мере датчик потока и датчик температуры, оба расположенные на расположенном вверх по потоку конце 11 трубопроводной транспортной системы 10.

В одном варианте выполнения первый датчик 51 конфигурации датчиков системы управления потоком содержит датчик температуры, расположенный на расположенном вверх по потоку конце 11 трубопроводной транспортной системы 10, и

любое из:

- первый датчик 51 дополнительно содержит датчик давления и второй датчик 52 содержит датчик давления,

- первый датчик 51 дополнительно содержит датчик давления и второй

датчик 52 содержит датчик потока,

- первый датчик 51 дополнительно содержит датчик потока и второй датчик 52 содержит датчик давления,

или

- первый датчик 51 дополнительно содержит датчик потока и второй датчик 52 содержит датчик потока.

Результаты имитации от блока имитации потока применяются для регулирования потока в трубопроводной транспортной системе 10 путем регулировки актуатора(ов) 61 конфигурации актуаторов до установочных значений, определенных блоком управления 20 с учетом результатов имитации потока. Установочные значения могут быть определены с использованием одного или нескольких следующих алгоритмов, которые должны быть хорошо известны специалистам в данной области: контур ПИД-управления (PID control loop), предварительно обученный алгоритм машинного обучения и/или алгоритм поиска глобального или локального оптимума.

Перечень фигур

На Фигуре 1 схематически проиллюстрирован примерный вариант выполнения трубопроводной системы для транспортировки перерабатываемых текучих сред при нефтегазодобыче.

Фигура 2 представляет собой графическое изображение пробкового потока в сечении трубопровода, на котором проиллюстрирован пример области хвостовой части пробки и расстояния L_{tail} , как применяется в настоящем изобретении.

Фигура 3 представляет собой схему, на которой показано сравнение спрогнозированного поведения текучей среды пробки в горизонтальном трубопроводе с помощью 1D CFD-модели с и без адаптации прогнозирования скорости пузыря Тейлора согласно изобретению.

Фигура 4 представляет собой схему, на которой проиллюстрировано другое сравнение спрогнозированного поведения текучей среды пробки в горизонтальном трубопроводе с помощью 1D CFD-модели. На Фигуре показаны результаты имитации с и без адаптации прогнозирования скорости пузыря Тейлора согласно изобретению для разных скоростей смеси по сравнению с предварительно заданной (желаемой) скоростью пузыря Тейлора.

Фигура 5 представляет собой графическое изображение, на котором схематически проиллюстрирован примерный вариант выполнения системы

управления потоком согласно изобретению.

Фигура 6 представляет собой графическое изображение, на котором схематически проиллюстрирован другой примерный вариант выполнения системы управления потоком согласно изобретению.

Проверка изобретения

Изобретение будет описано более подробно посредством проверочных испытаний и примера применения аналитически сформулированной модели.

Пример 1

Следующий пример демонстрирует влияние силы скорости пузыря пробки. Коммерчески доступная 1D CFD-модель LedaFlow была применена для имитации многофазного потока в горизонтальной трубе длиной 600 м с внутренним диаметром 0,189 м с и без адаптации согласно первому аспекту изобретения. Давление текучей среды в потоке было принято равным 10 МПа, а плотность газа и жидкости была установлена равной 100 кг/м^3 и 845 кг/м^3 соответственно. И газ, и жидкость были смоделированы как несжимаемые. Вязкости газа и жидкости были установлены равными $2 \cdot 10^{-5}$ и $1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ соответственно.

Имитация была инициализирована только с газом. При $t=0$ жидкость начинает течь в трубу и заполняет все поперечное сечение трубы для впрыска пробки в трубу. При $t=38,3$ с ввод мгновенно переключился с впрыска жидкости на впрыск чистого газа. Впрыснутые массовые расходы в трубе были такими, что скорость смеси была всегда постоянной, 3 м/с. При течении газа в трубе мы имеем ситуацию с пробкой, перемещающейся в трубе с пузырем Тейлора позади нее. В этих условиях предварительно заданная скорость пузыря Тейлора была вычислена с помощью аналитически сформулированной модели из литературы (собственная модель LedaFlow на основе модели Bendiksen [4]), и составляла 3,6 м/с.

Сравнение результатов имитации в моменты времени $t=50$, $t=100$ и $t=175$ с показаны на Фигуре 3 для имитаций как с применением силы (левый столбец), так и без применения силы (правый столбец). По ходу имитации пробка становится меньше, поскольку в передней части отсутствует жидкость, которую пробка могла бы поглощать, тогда как пробка в то же время теряет жидкость в хвостовой части.

Имитации были подвергнуты постобработке для определения местоположения вершины хвостовой части пробки (вершины носовой части пузыря Тейлора) для каждого временного шага, которое обозначено черным

квадратом. Положение, где в идеале должна располагаться вершина хвостовой части пробки (исходя из желаемой скорости 3,6 м/с), также отмечено черным кружком. Можно ясно видеть, что местоположение вершины хвостовой части пробки при имитации с применением силы совпадает с желаемым положением, тогда как пузырь Тейлора при имитации без применения силы явно перемещается слишком медленно. При использовании первого и последнего обнаруженного положения вершины хвостовой части пробки было обнаружено, что средняя скорость пузыря Тейлора составляет 3,6 м/с при применении адаптации согласно изобретению и 3,26 м/с без адаптации согласно изобретению. Т.е. с адаптацией согласно изобретению получается именно желаемая скорость, тогда как при имитации без адаптации имитация дает слишком низкую скорость (ниже примерно на 9,5%). Это существенная разница, и она будет иметь большое влияние на то, останется ли пробка или исчезнет. Также можно видеть, что поскольку пробка при имитации с применением силы теряет больше жидкости, больше жидкости остается позади, что существенно влияет на рост волны позади пробки.

Пример 2

В этом примере выполнено больше имитаций, которые описаны в примере 1, но для разных скоростей смеси. Единственное отличие от примера 1 состоит в скорости смеси и времени в имитации до переключения с газа на жидкость, которое вычисляется как $9,45 + 100/U_{mix}$. Результаты были постобработаны аналогично примеру 1, обнаруживая вершину хвостовой части пробки на каждом временном шаге и вычисляя результирующую скорость.

На Фигуре 4 показаны отклонения между полученными и желаемыми скоростями пузыря Тейлора из имитаций с и без применения силы на левом и правом графике соответственно. Можно видеть, что в имитациях с применением силы отклонение обычно находится в пределах 0,5%, хотя при наибольшей скорости смеси отклонение составляет около 2%. Это намного меньше, чем отклонения, полученные без применения силы, где погрешность составляет примерно 9-13% (слишком низкая скорость).

Пример определения предварительно заданной скорости пузыря Тейлора с помощью аналитически сформулированной модели

В этом примере применяется аналитически сформулированную модель Bendixsen [4] для вычисления предварительно заданной скорости пузыря Тейлора, U_b , которая может быть обобщенно представлена как:

$$U_b = C_0 U_{mix} + U_0 \quad (14)$$

где:

$$\begin{array}{ll}
 C_0 & U_0 \\
 1,05 + 0,15 \sin(\theta)^2 & 0,351 \sin(\theta) \sqrt{gD} + 0,542 \cos(\theta) \sqrt{gD} \quad Fr_{mix} < 3,5 \\
 1,2 & 0,351 \sin(\theta) \sqrt{gD} \quad Fr_{mix} \geq 3,5
 \end{array}$$

Здесь U_b - скорость пузыря Тейлора, U_{mix} - скорость смеси, U_0 - скорость дрейфа, а θ - наклон трубы. Fr_{mix} - число Фруда смеси, определенное как:

$$\frac{U_{mix}}{\sqrt{gD \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} \right)}} \quad (15)$$

ρ - плотность, g - гравитационное ускорение, а D - диаметр трубы. Для упрощения вычисления и достижения непрерывности U_b между уравнениями для двух чисел Фруда мы выбираем максимальное значение из двух.

Для нахождения скорости пузыря Тейлора для ячейки i в вычислительной модели мы используем скорость смеси, плотность и свойства трубы ячейки i в уравнении (14). Предположим, что значения в ячейке i на определенном временном шаге составляют: $\rho_l=1000$, $\rho_g=1$, $D=0,1$, $U_{mix}=3$, $\theta=0$ и $g=9,81$. Тогда уравнения для двух чисел Фруда дают следующие значения, большее из которых применяется CFD-моделью:

$$\begin{array}{ll}
 U_b = 1,05 \times 3 + 0,5368 = 3,6868 & Fr_{mix} < 3,5 \\
 U_b = 1,2 \times 3 = 3,6 & Fr_{mix} \geq 3,5
 \end{array}$$

Ссылки

1. Dukler, A.E. и M.G. Hubbard, «A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes», Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1975. 14(4): стр. 337-347.
2. Issa, R.I. и M.H.W. Kempf, «Simulation of slug flow in horizontal and nearly horizontal pipes with the two-fluid model», International Journal of Multiphase Flow, 2003. 29(1): стр. 69-95.
3. Sanderse, B., M. Haspels и R.A.W.M. Henkes, «Simulation of Elongated Bubbles in a Channel Using the Two-Fluid Model», Journal of Dispersion Science and Technology, 2015. 36(10): стр. 1407-1418.
4. Bendiksen, K. H. (1984). «An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes». International Journal of Multiphase Flow 10(4): 467-483.
5. Dumitrescu, D. (1943). «Strömung an Einer Luftblase im Senkrechten rohr» Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 23(3): 139-149.
6. Gokcal, B. (2008). An Experimental and Theoretical Investigation of Slug Flow for High Oil Viscosity in Horizontal Pipes. Талса, Университет Талсы, Оклахома. PhD:

146.

7. Jeyachandra, B. C., и др. (2012). «Drift-Velocity Closure Relationships for Slug Two-Phase High-Viscosity Oil Flow in Pipes». SPE Journal 17(2): 593-601.

8. Viana, F. и др. (2003). «Universal correlation for the rise velocity of long gas bubbles in round pipes». Journal of Fluid Mechanics 494: 379-398.

9. Cook M, Behnia M (2000) «Slug length prediction in near horizontal gas liquid intermittent flow». Chem Eng Sci 55:2009-2018.

Способ и инструмент для планирования и определения размеров подводных трубопроводных транспортных систем для многофазных потоков

Область техники, к которой относится изобретение

Это изобретение относится к компьютерно-реализуемому способу для прогнозирования поведения текучей среды в трубопроводных транспортных системах для транспортировки многофазных потоков, которые могут включать в себя гидродинамические пробковые потоки. Изобретение дополнительно относится к одномерной CFD-модели, которая может обеспечивать более реалистичные прогнозы скорости пузырей Тейлора.

Предпосылки создания изобретения

Нефтяная промышленность находится под постоянным давлением минимизировать воздействие новых разработок на окружающую среду и при этом оставаться прибыльной даже в условиях падения цен на нефть. Ключевым элементом для достижения этих целей было привязывание новых скважин к существующей инфраструктуре вместо строительства новых установок для каждой разработки. Эта стратегия доказала успешность, но новые запасы углеводородов обнаруживаются на все большем расстоянии от существующих перерабатывающих установок и в некоторых случаях может быть необходимо транспортировать непереработанные текучие среды на сотни километров или более.

Транспортировка многофазных текучих сред на такие расстояния является сложной по нескольким причинам, и одним из основных препятствий является риск образования длинных пробок. В частности, известно, что жидкостные пробки имеют склонность расти при прохождении больших расстояний, и это необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации систем добычи. Способность правильно прогнозировать характеристики пробкового потока имеет большое значение как на этапе проектирования установок добычи углеводородов, так и во время эксплуатации.

На этапе проектирования размеры пробок и их частота являются важными параметрами для проектирования размера приемных установок, таких как пробкоуловитель/пробкоотделитель. В этом случае недостаточный коэффициент запаса может приводить к серьезным эксплуатационным проблемам, которые ограничивают срок службы системы добычи, а также к частым нештатным

остановкам со значительным снижением добычи. В дополнение, силы, воздействующие на изгибы труб и пролеты трубопровода, чувствительны к характеристикам образования пробок. В частности, пробки вызывают изменения нагрузки и последующие вибрации, которые сокращают срок службы фитингов труб и других уязвимых компонентов. Когда месторождение эксплуатируется, способность прогнозировать характеристики пробок важна для исследования влияния возможных действий по уменьшению воздействия, таких как надводное дросселирование или применение газлифта, на уменьшение интенсивности образования пробок.

Средняя задержка жидкости и падение давления также важны: недооценка падения давления может приводить к заниженному диаметру трубопровода и тем самым к уменьшенной производительности во время этапа добычи. С другой стороны, преувеличенная оценка падения давления может приводить к завышению диаметра трубопровода, что может создавать нестабильности потока и ухудшать пригодность системы к эксплуатации. Эти вопросы жизненно важны для экономии и осуществимости всех систем добычи углеводородов, и необходимы точные имитационные модели для прогнозирования последствий разных конструкций и подходов.

Уровень техники

Моделирование газожидкостного потока в трубопроводе и особенно способность прогнозировать пробковый поток с помощью моделей вычислительной гидродинамики (CFD) широко исследовались как в нефтегазовой отрасли, так и в отрасли ядерных реакторов.

Компьютерные коды программного обеспечения CFD обычно состоят из трех основных элементов: (i) препроцессора, (ii) решателя и (iii) постпроцессора. Элемент препроцессора относится к определению/вводу проблемы потока текучей среды, подлежащей имитации. Элемент постпроцессора относится к выходным данным имитации/выводу результатов имитации и т.д. Элемент решателя относится к численному решению законов природы, определяющих явления переноса, конвекцию, диффузию и, если присутствуют, любые источниковые члены.

Определяющие управления потока текучей среды представляют собой математические формулировки, выражающие законы сохранения физики для обеспечения сохранения массы, импульса и энергии текучей среды. Кроме того,

эти уравнения нелинейны и связаны, что означает, что, например, уравнение импульса зависит от решения уравнения массы и наоборот. Текучая среда обрабатывается как непрерывная, когда ее поведение описывается с точки зрения макроскопических свойств, таких как скорость, давление, плотность и температура.

При имитации трубопровода нефтяного месторождения использование обычных двух- или трехмерных CFD-кодов обычно невозможно из-за физических размеров/длины труб, и на завершение имитации могут уходить годы. В связи с этим моделирование длинных трубопроводов с помощью численных моделей вычислительной гидродинамики всегда выполняется с использованием одномерных (1D) усредненных уравнений сохранения для достижения приемлемого времени имитации. В таких 1D моделях уравнения усредняются по ширине и высоте трубы, в результате чего получается одномерная модель, которая в вычислительном отношении намного быстрее и может имитировать трубопровод в пределах разумных временных рамок. Такие модели в литературе часто называются двухжидкостными или трехжидкостными моделями. Однако процедура усреднения отбрасывает члены в уравнениях переноса, что делает 1D модель более приближенной, чем исходные определяющие уравнения. Это делает 1D модель зависимой от эмпирических корреляций, подобранных на основе экспериментальных данных и/или дополнительных компонентов модели, для получения хороших результатов.

Наиболее широко используемый подход для моделирования пробкового потока заключается в применении относительно крупной сетки вместе с подсеточной моделью, которая обрабатывает пробковый поток усредненным образом, предполагая локально установившийся полностью развившийся поток. Этот тип моделирования часто называется подходом Модели элементарной ячейки (Unit-Cell Model, UCM) на основе концепции, впервые представленной Dukler и Hubbard [1]. Эта модель может прогнозировать как задержку жидкости, так и падение давления, но способна давать только среднюю долю пробок в трубе без информации о длине пробок или частоте пробок.

Альтернативный подход для моделирования пробкового потока, обычно называемый «улавливание пробок», впервые был предложен Issa [2]. При улавливании пробок 1D уравнения многофазного потока решаются на относительно мелкой сетке, что исключает необходимость в подсеточной модели, используемой в подходе UCM. При этом подходе волны растут естественным

образом из нестабильностей и развиваются в пробки без необходимости специальных моделей инициирования.

Один из наиболее важных аспектов моделирования пробкового потока заключается в точном прогнозировании скорости больших пузырей, разделяющих пробки (пузырей Тейлора). Скорость пузыря Тейлора определяет, сколько жидкости теряют пробки в хвостовой части пробки, а также главным образом определяет среднюю задержку жидкости в пробковом потоке. Таким образом, слишком большая скорость приводит к уменьшению длины пробок (возможно, исчезанию), тогда как слишком низкая скорость приводит к росту пробок. Другими словами, скорость пузыря Тейлора представляет собой параметр, который имеет большое влияние на длину пробок.

Sanderse и др. [3] показали, что невозможно получать правильную скорость дрейфа пузыря Тейлора с помощью обычных уравнений 1D модели без введения корректировки. Причина этого состоит в том, что скорость пузыря Тейлора является продуктом механизмов, которые по своей сути являются трехмерными, и некоторые из связанных с ними эффектов неизбежно теряются, когда уравнения усредняются до 1D.

Однако в литературе известны несколько аналитически сформулированных моделей, для обеспечения реалистичных прогнозов скоростей пузырей Тейлора. Все такие модели обычно основаны на одном и том же принципе. Примеры этой модели и различных улучшений включают в себя Bendiksen [4], Dumitrescu [5], Gokcal [6], Jeyachandra и др. [7] и Viana и др. [8].

Задача изобретения

Основной задачей изобретения является обеспечение компьютерно-реализуемого способа для прогнозирования поведения текучей среды многофазного потока в трубопроводной транспортной системе с помощью 1D CFD-модели.

Дополнительной задачей изобретения является обеспечение компьютерно-реализуемого способа для прогнозирования поведения текучей среды многофазного потока в трубопроводной транспортной системе, включающего в себя гидродинамические пробковые потоки, с помощью 1D CFD-модели, обеспечивающей более точные скорости пузырей Тейлора.

Другой задачей изобретения является обеспечение компьютерно-реализуемого способа для проектирования транспортных систем для многофазных потоков текучей среды.

Дополнительной задачей изобретения является компьютерно-реализуемый инструмент имитации для проектирования/оптимизации и/или поиска и устранения проблем трубопроводной транспортной системы для многофазных потоков текучей среды.

Описание изобретения

Изобретение основано на осознании того, что известные недостатки одномерных CFD-моделей при прогнозировании скоростей пузыря Тейлора можно преодолевать, заставляя CFD-модель прогнозировать скорость пузыря Тейлора, равную предварительно заданной скорости пузыря Тейлора, вычисленной на основе, например, аналитически сформулированной модели скорости пузыря Тейлора, подобной упомянутым ранее или определенной другим способом. Применение CFD-модели для нахождения предварительно заданной скорости пузыря Тейлора согласно изобретению осуществляется посредством введения силового члена в уравнение импульса для газовой фазы на вершине хвостовой части пробки и вблизи нее, который пропорционален разнице между скоростью пузыря Тейлора, спрогнозированной CFD-моделью, и предварительно заданной скоростью пузыря Тейлора.

В общем уравнение импульса газа может быть упрощено и записано следующим образом:

$$\frac{\partial(M_g U_g)}{\partial t} + FRIC_g + GRAV_g + CONV_g + \dots = 0 \quad (1)$$

где M_g - масса газовой фазы, U_g - скорость газовой фазы, $FRIC_g$ - фрикционные члены газовой фазы, $GRAV_g$ - гравитационные члены газовой фазы, а $CONV_g$ - конвективные члены газовой фазы. Фрикционные и конвективные члены зависят от массы и скорости.

Уравнение импульса газа может, например, быть дискретизировано, чтобы быть линейно зависимым от новой скорости газа, как показано в ур. (2):

$$\frac{M_g^{n+1} U_g^{n+1} - M_g^n U_g^n}{\Delta t} + FRIC_g(U_g^{n+1}) + GRAV_g + CONV_g(U_g^{n+1}) + \dots = 0 \quad (2)$$

где U_g^{n+1} - новая скорость газа на следующем временном шаге $n+1$, а U_g^n - скорость газа на текущем временном шаге n . И аналогично, M_g^{n+1} - новая масса газовой фазы на следующем временном шаге $n+1$, а M_g^n - масса газовой фазы на текущем временном шаге n .

Дискретизированное уравнение импульса может быть преобразовано и

упрощено посредством сбора всех членов, умножаемых на $n+1$ -ю скорость газа, в левой части, а остальных членов в правой части:

$$A_g \cdot U_g^{n+1} = B_g \quad (3)$$

причем член A_g содержит новую массу газа, $\frac{M_g^{n+1}}{\Delta t}$, и коэффициенты от трения и конвекции. Член B_g содержит члены явной части производной по времени, $\left(\frac{M_g^n U_g^n}{\Delta t}\right)$, и гравитационный член.

Эта же процедура может быть использована, когда в уравнение импульса газа вводится силовой член, определяемый как $F(U_g^{n+1}-U_b)$, где F - коэффициент силы, U_g^{n+1} - спрогнозированная (с помощью CFD-модели) скорость пузыря Тейлора, а U_b – предварительно заданная скорость пузыря Тейлора. Тогда уравнение импульса газа имеет вид:

$$\frac{M_g^{n+1} U_g^{n+1} - M_g^n U_g^n}{\Delta t} + FRIC_g(U_g^{n+1}) + GRAV_g + CONV_g(U_g^{n+1}) + F(U_g^{n+1} - U_b) + \dots = 0 \quad (4)$$

Оно может быть преобразовано и упрощено для чтения:

$$(A_g + F) \cdot U_g^{n+1} = B_g + F U_b \quad (5)$$

Когда коэффициент F становится большим, т.е. $F \gg A_g$ и $F \gg B_g/U_b$, ур. (5) может быть приблизительно выражено как:

$$F \cdot U_g^{n+1} = F U_b \quad (6)$$

Таким образом, большое значение коэффициента силы F приводит к тому, что спрогнозированная скорость пузыря Тейлора приближается к предварительно заданной скорости пузыря Тейлора. Специалисту в данной области техники очевидно, что переменные M_g^{n+1} , Δx , U_g^{n+1} , F , A_g и B_g оцениваются локально, т.е. для каждого i -го конечного контрольного объема области вычислений. Однако индекс i опущен для упрощения терминологии.

Чтобы сохранять импульс при CFD-имитации, член силы аналогичного размера и противоположного направления добавлен в уравнение импульса для соседней жидкой фазы, т.е. жидкой фазы, находящейся в контакте с газом в том же контрольном объеме:

$$\frac{\partial(M_l U_l)}{\partial t} + FRIC_l + GRAV_l + CONV_l - F(U_g - U_b) + \dots = 0 \quad (7)$$

где M_l - масса газовой фазы, U_g - скорость газовой фазы, $FRIC_l$ - фрикционные члены жидкой фазы, $GRAV_l$ - гравитационные члены жидкой фазы, а $CONV_l$ - конвективные члены жидкой фазы. При применении такой же схемы

дискретизации и такого же упрощения и преобразования, что и для уравнения импульса газа, уравнение импульса для жидкости, ур. (7), может быть получено как:

$$A_l U_l^{n+1} - F U_g^{n+1} = B_l - F U_b \quad (8)$$

где член A_l содержит новую массу жидкости и коэффициенты как трения, так и конвекции. Член B_l содержит члены из явной части производной по времени и гравитационный член.

Таким образом, в первом аспекте изобретение относится к компьютерно-реализуемому способу для прогнозирования поведения текучей среды многофазного потока в трубопроводной транспортной системе, где поток содержит по меньшей мере одну газовую фазу и одну жидкую фазу, причем способ содержит:

применение одномерной (1D) модели вычислительной гидродинамики (CFD), описывающей геометрию интересующей секции трубопроводной транспортной системы и многофазного потока, текущего в ней, и

решение 1D CFD-модели для имитации поведения текучей среды многофазного потока в интересующей секции трубопроводной транспортной системы,

причем

1D CFD-модель применяет метод конечных объемов для решения модели, причем геометрия интересующей секции трубопроводной транспортной системы определяется как область вычислений, продолжающаяся вдоль оси, представленной декартовой координатой x , и разделенная на набор N , где N - целое положительное число, не перекрывающихся конечных контрольных объемов, разделенных внутренней поверхностью между смежными конечными контрольными объемами,

отличающийся тем, что 1D CFD-модель выполнена с возможностью:

поиска и идентификации вершин хвостовых частей пробок в области вычислений, где вершина хвостовой части пробки определяется как конечный контрольный объем, имеющий долю газа менее 0,02, и расположенный вверх по потоку соседний конечный контрольный объем с долей газа более 0,02, и,

для каждой идентифицированной вершины хвостовой части пробки, определения области хвостовой части пробки, состоящей из вершины хвостовой части пробки и каждого конечного контрольного объема, лежащего в пределах расстояния L_{tail} , продолжающегося в направлении вверх по потоку от вершины

хвостовой части пробки, где расстояние $L_{tail} = \Delta x \left(4 + \frac{1}{\Delta x^*}\right)$, где $\Delta x^* = 1$, если $\frac{\Delta x}{D} \leq 15$, или $\Delta x^* = e^{\frac{\Delta x}{15D}} - 1$, если $\frac{\Delta x}{D} > 15$, D - внутренний диаметр интересующей секции трубопроводной транспортной системы, а Δx - длина ячейки конечного контрольного объема,

и дополнительно отличающийся тем, что

1D CFD-модель для каждой идентифицированной области хвостовой части пробки дополнительно выполнена с возможностью применения корректировки хвостовой части пробки, содержащей:

корректировку скорости газа для каждого конечного контрольного объема области хвостовой части пробки путем добавления в уравнение импульса газа силового члена, $F(U_g^{n+1} - U_b) \cdot W$ где F - коэффициент силы, U_g^{n+1} - скорость газа на следующем временном шаге $n+1$, применяемая CFD-моделью, U_b - предварительно заданная скорость пузыря Тейлора, W - весовая функция, имеющая значение 1 для конечного контрольного объема на вершине хвостовой части пробки, и значение между 0 и 1 для конечных контрольных объемов, лежащих в пределах расстояния L_{tail} , и где $F \geq 10 \cdot \max(|A_g|, |B_g/U_b|)$, где A_g и B_g получаются путем преобразования адаптированного дискретизированного уравнения импульса газа так, что все члены, умноженные на U_g^{n+1} , размещены в левой части, а остальные члены размещены в правой части, чтобы дать адаптированное дискретизированное уравнение импульса газа в форме:

$$(A_g + F \cdot W) \cdot U_g^{n+1} = B_g + F \cdot W \cdot U_b$$

и

применение корректировки скорости жидкости для каждого конечного контрольного объема области хвостовой части пробки для соседней жидкой фазы текучей среды в контакте с газовой фазой многофазного потока путем вычитания из уравнения импульса для соседней жидкой фазы силового члена, $F(U_g^{n+1} - U_b) \cdot W$.

Настоящее изобретение не ограничивается каким-либо выбором схемы дискретизации или алгоритма численного решения за исключением того, что 1D CFD-модель должна применять подход метода конечных объемов, а силовой член неявно представлен в скорости. Уравнение импульса газа может быть дискретизировано многими способами, включая полностью неявные схемы как по

массе, так и по скорости, полностью явные схемы или их комбинацию.

Как использовано в настоящем документе, термин «трубопроводная транспортная система» охватывает все компоненты транспортной системы, необходимой для транспортировки текучей среды, включая сегменты трубопроводов, разветвления, соединения, клапаны, насосы, источники, стоки и т.д. Пример трубопроводной транспортной системы для жидкостей, производимых в нефтегазодобыче, показан на Фигуре 1, на которой схематически проиллюстрирован примерный вариант выполнения такой системы транспортировки. Этот примерный вариант выполнения содержит множество хвостовиков/трубопроводов (2), соединяющих добывающую скважину (1) с близлежащим узлом-спутником (3), который собирает добытую текучую среду в области и передает добытую текучую среду по трубопроводу-спутнику (4) в общий узел (5). Примерный вариант выполнения содержит четыре узла-спутника (3), каждый из которых соединен с общим (5) посредством трубопровода-спутника (4). Общий узел (5) передает добытую текучую среду в перерабатывающую установку, расположенную в море на поверхности моря, с помощью райзера (не показан в этом варианте выполнения), или в береговую производственную установку по трубопроводу транспортировки текучей среды (6). Транспортная система обычно включает в себя один или более насосов текучей среды (7) для обеспечения необходимого давления потока для перемещения текучих сред через транспортную систему. Вышеприведенный примерный вариант выполнения не должен интерпретироваться узко. Трубопроводная транспортная система может иметь любую возможную конфигурацию: от единственного трубопровода для транспортировки текучей среды до взаимно соединенных сетевых трубопроводов для транспортировки текучей среды на, например, заводах химической промышленности, для соединения морских добывающих установок с береговыми установками приема добытой текучей среды и т.д.

Как использовано в настоящем документе, термин «предварительно заданная скорость пузыря Тейлора» относится к опорному значению, при котором выполнена адаптированная 1D CFD-модель согласно первому аспекту изобретения посредством адаптации прогнозирования. Предварительно заданная скорость пузыря Тейлора может быть получена любым подходящим способом, известным специалисту в данной области техники, например, путем эмпирического определения скоростей пузыря Тейлора, прогнозирования предварительно заданных скоростей пузыря Тейлора с помощью прямых

имитаций Навье-Стокса или прогнозирования предварительно заданной скорости пузыря Тейлора с помощью аналитически сформулированной модели из литературы, такой как, например, модели Bendiksen [4], Dumitrescu [5], Gokcal [6], Jeyachandra и др. [7] или Viana и др. [8].

Обнаружено, что адаптированная 1D CFD-модель согласно первому аспекту изобретения может в некоторых случаях становиться неустойчивой, если коэффициент силы становится слишком большим или если его значение меняется слишком быстро от ячейки к ячейке. Таким образом, в примерном варианте выполнения 1D CFD-модели согласно первому аспекту изобретения для получения плавной и уменьшающейся силы в области хвостовой части пробки весовая функция W может быть определена для каждого конечного контрольного объема области хвостовой части пробки посредством соотношения:

$$W = \text{MAX} \left(0; 0,5 \left(1 - \tanh \left(\frac{6L}{5 \frac{\Delta x}{D}} - 3 - \frac{1}{\Delta x^*} \right) \right) \right) \cdot \Psi(Fr) \quad (9)$$

где функция $\Psi(Fr)$ представляет собой:

$$\Psi(Fr) = 0,5(1 + \tanh(10(Fr - 0,5))) \quad (10)$$

число Фруда, Fr , представляет собой:

$$Fr = \frac{|U_{mix}|}{\sqrt{gD \cos(\theta) \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} \right)}} \quad (11)$$

и где L - расстояние от i -го конечного контрольного объема области хвостовой части пробки до вершины хвостовой части пробки, g - гравитация, U_{mix} - общий объемный расход, деленный на площадь поперечного сечения трубы, θ - угол трубы, измеренный относительно горизонтальной плоскости, ρ_g - плотность газа, а ρ_l - среднее объемное значение плотностей одной или более жидкостей, находящихся в конечном контрольном объеме. Весовой коэффициент W уравнения (9) спроектирован так, чтобы он был равен 1 на вершине хвостовой части пробки и стремился к нулю на расположенном вверх по потоку конце области хвостовой части пробки (от пробки).

Как использовано в настоящем документе, термин «область хвостовой части пробки» представляет собой подобласть области вычислений, охватывающую все конечные контрольные объемы, лежащие от вершины хвостовой части пробки и на расстоянии L_{tail} в направлении вверх по потоку, т.е. расстояние L_{tail} продолжается в направлении, противоположном направлению

потока. Таким образом, термин «направление вниз по потоку», как использовано в настоящем документе, означает направление по направлению потока, тогда как термин «направление вверх по потоку», как использовано в настоящем документе, означает направление в противоположном направлении направлению потока.

Фигура 2 представляет собой графическое изображение, на котором проиллюстрирован пример пробкового потока, включающего в себя жидкую и газовую фазу внутри секции трубопровода. Сплошная линия, обозначенная ссылочным номером 1, представляет собой крупномасштабную границу раздела, отделяющую непрерывную газовую фазу от непрерывной жидкой фазы многофазного потока. Положение крупномасштабной границы раздела масштабировано как $1 - \alpha$, где α - доля газа. Каждая точка 2 на линии 1 обозначает центральное положение на декартовой координате x конечных контрольных объемов, применяемых 1D CFD-моделью сегмента трубопровода. Пунктирная стрелка 3 показывает направление многофазного потока. Как видно на Фигуре, непрерывная газовая фаза/пузырь Тейлора 4 давит на пробку 5 из жидкости, которая заполняет все поперечное сечение трубы.

Конечный контрольный объем, обозначенный ссылочным номером 6, лежит на вершине хвостовой части пробки, т.е. заднем (расположенном вверх по потоку) конце жидкостной пробки. Расстояние L_{tail} продолжается в направлении вверх по потоку (т.е. в направлении, противоположном направлению потока), которое в этом в примерном варианте выполнения охватывает 4 соседних конечных контрольных объема, обозначенных ссылочной позицией 7. Таким образом, область хвостовой части пробки в этом примерном варианте выполнения включает в себя конечный контрольный объем 6 на вершине хвостовой части пробки и его 4 ближайших соседних конечных контрольных объема 7 в направлении вверх по потоку.

Из литературы хорошо известно, что аналитически сформулированные модели скорости пузыря Тейлора меньше подходят для коротких пробок. Для коротких пробок возмущения с передней части пробки будут распространяться через пробку и влиять на профиль скорости в носовой части пузыря Тейлора позади нее, заставляя носовую часть пузыря Тейлора ускоряться. Это было подтверждено экспериментально в нескольких исследованиях и было предложено много корреляций для увеличения скорости пузыря Тейлора как функции длины пробки. Этот эффект следа будет заставлять более короткие пробки (обычно <10

D по длине) терять больше жидкости в хвостовой части пробки, чем более длинные пробки, и этот процесс приводит к тому, что короткие пробки исчезают и превращаются в большие волны. Преобладающие волны, которые имеют склонность двигаться медленнее, чем пробки, затем поглощаются находящимися сзади пробками, которые впоследствии увеличиваются в длину. Авторы настоящего изобретения обнаружили, что эффект следа может оказывать значительное влияние на прогнозируемые длины пробок. Без корректировки эффекта следа преобладающее распределение длин пробок в прогнозируемом потоке может содержать слишком много коротких пробок и слишком мало больших пробок, что в некоторых случаях может приводить к проблемам сходимости сетки. В частности, при доработке вычислительной сетки все более и более короткие пробки устраняются, и без эффекта следа для исключения малых пробок результатом будет частота пробок, главным образом зависящая от размера сетки.

Таким образом, в примерном варианте выполнения изобретение согласно первому аспекту изобретения может дополнительно быть выполнено с возможностью включения в себя корректировки эффекта следа, где заданная скорость пузыря Тейлора регулируется как функция длины пробки, L_S , такой как, например, корректировка, разработанная Cook & Behnia [9], которая выглядит следующим образом:

$$U_b = U_{b,\infty} \left(1 + 0,56e^{-0,46\frac{L_S}{D}} \right) \quad (13)$$

где $U_{b,\infty}$ - скорость пузыря Тейлора, который толкает длинную пробку, на которую не влияет эффект следа, L_S - длина пробки перед пузырем Тейлора, а D - внутренний диаметр трубы.

В примерном варианте выполнения способа согласно первому аспекту изобретения 1D CFD-модель может применять подход улавливания пробок, при котором 1D уравнения многофазных потоков решаются на сетке с $\Delta x \leq 10 \cdot D$, где Δx - длина ячеек конечного контрольного объема интересующей секции, а D - внутренний диаметр трубопровода интересующей секции.

Во втором аспекте изобретение относится к способу для оптимизации конструкции трубопроводной системы транспортировки текучей среды для транспортировки многофазного потока текучей среды, причем способ содержит:

- подготовку по меньшей мере двух разных конструкций системы транспортировки текучей среды,

- применение компьютерно-реализуемого способа согласно первому аспекту изобретения для прогнозирования поведения текучей среды в каждой из по меньшей мере двух разных конструкций и

- применение спрогнозированного поведения текучей среды для определения оптимизированной конструкций системы транспортировки текучей среды.

Оптимизация конструкции системы транспортировки может принимать во внимание один или более таких факторов, как диаметр трубопровода, траектория трубопровода на местности, количество насосов для поддержания давления, их местоположение и эффект повышения давления, количество дроссельных клапанов, их местоположение и эффект уменьшения объема потока и т.д., с целью экономии капитальных вложений и эксплуатационных затрат путем идентификации оптимальных физических размеров и/или траектории на местности труб транспортных систем без ущерба для стабильности поведения текучей среды и пропускной способности. Кроме того, оптимизация конструкции трубопроводной системы транспортировки текучей среды в примерном варианте выполнения может применять симитированные размеры пробок и частоту пробок для оптимизации размера приемных установок, таких как пробкоуловитель и/или пробкоотделитель и т.д. Оптимизация конструкции трубопроводной системы транспортировки текучей среды в дополнительном примерном варианте выполнения также может применять симитированные размеры пробок и частоту пробок для оценки сил, воздействующих на изгибы труб и пролеты трубопровода в трубопроводной системе транспортировки текучей среды.

В третьем аспекте изобретение относится к способу для поиска и устранения проблем потока во время работы трубопроводной системы транспортировки текучей среды для транспортировки многофазного потока текучей среды, причем способ содержит:

- применение компьютерно-реализуемого способа согласно первому аспекту изобретения, в который загружена область вычислений, характерная для транспортной системы, имеющей проблемы с потоком, и входные данные характеристик потока в системе транспортировки, для прогнозирования влияния на поведение текучей среды в транспортной системе возможных действий по уменьшению воздействия и

- применение спрогнозированных поведений текучей среды для определения, какое действие по уменьшению воздействия должно быть

физически реализовано в транспортной системе, имеющей проблемы с потоком.

Действиями по уменьшению воздействия могут быть регулирование объемов потока в транспортной системе, надводное дросселирование, применение газлифта и другие.

В четвертом аспекте изобретение относится к компьютерной программе, содержащей инструкции по обработке, которая заставляет компьютер выполнять способ согласно любому из первого-третьего аспектов изобретения, когда инструкции исполняются устройством обработки в компьютере.

В пятом аспекте изобретение относится к компьютеру, содержащему устройство обработки и память компьютера, которая хранит компьютерную программу, как изложено в четвертом аспекте.

В шестом аспекте изобретение относится к автономной системе управления потоком (100), содержащей:

- блок имитации потока (30),
- конфигурацию датчиков, содержащую по меньшей мере первый датчик (51), расположенный на расположенном вверх по потоку конце (11), и второй датчик (51), расположенный на расположенном вниз по потоку конце (12) трубопроводной транспортной системы (10), и измеряющую один или более отличительных параметров потока многофазной текучей среды, текущей через трубопроводную транспортную систему (10),
- конфигурацию актуаторов, содержащую по меньшей мере один актуатор (61), выполненный с возможностью регулирования потока текучей среды через трубопроводную транспортную систему (10), и
- блок управления (20), выполненный с возможностью:
 - приема сигналов (53, 54) от конфигурации датчиков, измеряющей один или более отличительных параметров потока, и преобразования сигналов в одно или более граничных условий (21), передаваемых в блок имитации потока (30), и
 - приема результатов имитации (32) от блока имитации потока (30) и преобразования результатов имитации в установочные значения (22), передаваемые в актуатор(ы) (61) конфигурации актуаторов, причем
- блок имитации потока (30) содержит компьютер, в который загружено программное обеспечение, которое при исполнении выполняет компьютерно-реализуемый способ, имитирующий поведение текучей среды многофазного

потока, текущего в трубопроводной транспортной системе (10), с граничным(и) условием(ями) (21) от блока управления (20),

отличающейся тем, что

программное обеспечение компьютера блока имитации потока (30) представляет собой компьютерную программу согласно четвертому аспекту изобретения.

Конфигурация примерного варианта выполнения системы управления потоком согласно изобретению схематически проиллюстрирована на схеме, показанной на Фигуре 5. Трубопроводная транспортная система, управляемая системой управления потоком 100, схематически показана на Фигуре в виде рамки 10, имеющей расположенный вверх по потоку конец 11, принимающий текучую среду для транспортировки через транспортную систему до расположенного вниз по потоку конца 12, где текучая среда доставляется в установку приема текучей среды. Система управления потоком содержит дополнительный блок управления 20, блок имитации потока 30, конфигурацию датчиков, содержащую по меньшей мере первый датчик 51, расположенный на расположенном вверх по потоку конце 11, и второй датчик 52, расположенный на расположенном вниз по потоку конце 12 трубопроводной транспортной системы 10, и конфигурацию актуаторов, содержащую по меньшей мере один актуатор 61, выполненный с возможностью регулирования сквозного потока одной или более фаз текучей среды многофазного потока.

В другом примерном варианте выполнения системы управления потоком согласно изобретению система управления потоком дополнительно содержит второй актуатор 62, расположенный на расположенном вниз по потоку конце 12, и/или третий актуатор (не показан на Фигуре), расположенный в любом месте между расположенном вверх по потоку 11 и расположенный вниз по потоку 12 концами трубопроводной транспортной системы 10. В этом варианте выполнения установочное значение для второго актуатора 62 передается от блока управления в виде сигнала 23, а установочное значение для третьего актуатора передается от блока управления в виде сигнала 24. В одном варианте выполнения актуатор 61, 62 конфигурации актуаторов представляет собой управляющий клапан, барабанный сепаратор, компрессор, газовый инжектор или насос.

В одном варианте выполнения блок управления 20 может представлять собой Распределенную систему управления, Программируемый логический контроллер, Граничный шлюз, систему SCADA, систему Historian или Базу данных

временных рядов, реализуемые для покрытия уровней автоматизации 0, 1, и 2 согласно стандарту: ANSI/ISA-95.00.01-2010 (IEC 62264-1 Mod) Enterprise-Control System Integration – Part 1: Models and Terminology (Интеграция системы управления предприятием - Часть 1: Модели и терминология).

Блок управления 20 принимает сигналы датчиков 53, 54 от конфигурации датчиков, которые обычно представляют собой электрические сигналы, и преобразует их в один или более измеренных параметров потока, таких как, например, скорость потока одной или более фаз текучей среды, давление, температура, плотность одной или более фаз текучей среды, объемная или массовая доля одной или более фаз текучей среды и т.д. Эти измеренные один или более параметров потока передаются в блок имитации потока (30) и применяются в качестве граничного(ых) условия(й) в имитации многофазного потока.

Компьютерно-реализуемый способ для прогнозирования поведения текучей среды может в некоторых вариантах выполнения требовать информации соотношений газовой и жидкой фаз и температуры многофазного потока, входящего в транспортную систему на ее расположенном вверх по потоку конце, для прогнозирования поведения текучей среды. В некоторых применениях расходы и соответственно отношения газовой и жидкой фаз потока, входящего в трубопроводную транспортную систему, являются постоянными или практически постоянными. В таких случаях информация соотношений газовой и жидкой фаз может быть введена в качестве входной переменной для компьютерно-реализуемого способа. Таким образом, в одном варианте выполнения первый датчик 51 конфигурации датчиков системы управления потоком содержит по меньшей мере датчик температуры, расположенный на расположенном вверх по потоку конце 11 трубопроводной транспортной системы 10. В других применениях отношения газовой и жидкой фаз могут изменяться. Таким образом, в одном варианте выполнения первый датчик 51 конфигурации датчиков системы управления потоком содержит по меньшей мере датчик потока и датчик температуры, оба расположенные на расположенном вверх по потоку конце 11 трубопроводной транспортной системы 10.

В одном варианте выполнения первый датчик 51 конфигурации датчиков системы управления потоком содержит датчик температуры, расположенный на расположенном вверх по потоку конце 11 трубопроводной транспортной системы 10, и

любое из:

- первый датчик 51 дополнительно содержит датчик давления и второй датчик 52 содержит датчик давления,

- первый датчик 51 дополнительно содержит датчик давления и второй датчик 52 содержит датчик потока,

- первый датчик 51 дополнительно содержит датчик потока и второй датчик 52 содержит датчик давления,

или

- первый датчик 51 дополнительно содержит датчик потока и второй датчик 52 содержит датчик потока.

Результаты имитации от блока имитации потока применяются для регулирования потока в трубопроводной транспортной системе 10 путем регулировки актуатора(ов) 61 конфигурации актуаторов до установочных значений, определенных блоком управления 20 с учетом результатов имитации потока. Установочные значения могут быть определены с использованием одного или нескольких следующих алгоритмов, которые должны быть хорошо известны специалистам в данной области: контур ПИД-управления (PID control loop), предварительно обученный алгоритм машинного обучения и/или алгоритм поиска глобального или локального оптимума.

Перечень фигур

На Фигуре 1 схематически проиллюстрирован примерный вариант выполнения трубопроводной системы для транспортировки перерабатываемых текучих сред при нефтегазодобыче.

Фигура 2 представляет собой графическое изображение пробкового потока в сечении трубопровода, на котором проиллюстрирован пример области хвостовой части пробки и расстояния L_{tail} , как применяется в настоящем изобретении.

Фигура 3 представляет собой схему, на которой показано сравнение спрогнозированного поведения текучей среды пробки в горизонтальном трубопроводе с помощью 1D CFD-модели с и без адаптации прогнозирования скорости пузыря Тейлора согласно изобретению.

Фигура 4 представляет собой схему, на которой проиллюстрировано другое сравнение спрогнозированного поведения текучей среды пробки в горизонтальном трубопроводе с помощью 1D CFD-модели. На Фигуре показаны результаты имитации с и без адаптации прогнозирования скорости пузыря

Тейлора согласно изобретению для разных скоростей смеси по сравнению с предварительно заданной (желаемой) скоростью пузыря Тейлора.

Фигура 5 представляет собой графическое изображение, на котором схематически проиллюстрирован примерный вариант выполнения системы управления потоком согласно изобретению.

Фигура 6 представляет собой графическое изображение, на котором схематически проиллюстрирован другой примерный вариант выполнения системы управления потоком согласно изобретению.

Проверка изобретения

Изобретение будет описано более подробно посредством проверочных испытаний и примера применения аналитически сформулированной модели.

Пример 1

Следующий пример демонстрирует влияние силы скорости пузыря пробки. Коммерчески доступная 1D CFD-модель LedaFlow была применена для имитации многофазного потока в горизонтальной трубе длиной 600 м с внутренним диаметром 0,189 м с и без адаптации согласно первому аспекту изобретения. Давление текучей среды в потоке было принято равным 10 МПа, а плотность газа и жидкости была установлена равной 100 кг/м^3 и 845 кг/м^3 соответственно. И газ, и жидкость были смоделированы как несжимаемые. Вязкости газа и жидкости были установлены равными $2 \cdot 10^{-5}$ и $1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ соответственно.

Имитация была инициализирована только с газом. При $t=0$ жидкость начинает течь в трубу и заполняет все поперечное сечение трубы для впрыска пробки в трубу. При $t=38,3$ с ввод мгновенно переключился с впрыска жидкости на впрыск чистого газа. Впрыснутые массовые расходы в трубе были такими, что скорость смеси была всегда постоянной, 3 м/с. При течении газа в трубе мы имеем ситуацию с пробкой, перемещающейся в трубе с пузырем Тейлора позади нее. В этих условиях предварительно заданная скорость пузыря Тейлора была вычислена с помощью аналитически сформулированной модели из литературы (собственная модель LedaFlow на основе модели Bendiksen [4]), и составляла 3,6 м/с.

Сравнение результатов имитации в моменты времени $t=50$, $t=100$ и $t=175$ с показаны на Фигуре 3 для имитаций как с применением силы (левый столбец), так и без применения силы (правый столбец). По ходу имитации пробка становится меньше, поскольку в передней части отсутствует жидкость, которую пробка могла

бы поглощать, тогда как пробка в то же время теряет жидкость в хвостовой части.

Имитации были подвергнуты постобработке для определения местоположения вершины хвостовой части пробки (вершины носовой части пузыря Тейлора) для каждого временного шага, которое обозначено черным квадратом. Положение, где в идеале должна располагаться вершина хвостовой части пробки (исходя из желаемой скорости 3,6 м/с), также отмечено черным кружком. Можно ясно видеть, что местоположение вершины хвостовой части пробки при имитации с применением силы совпадает с желаемым положением, тогда как пузырь Тейлора при имитации без применения силы явно перемещается слишком медленно. При использовании первого и последнего обнаруженного положения вершины хвостовой части пробки было обнаружено, что средняя скорость пузыря Тейлора составляет 3,6 м/с при применении адаптации согласно изобретению и 3,26 м/с без адаптации согласно изобретению. Т.е. с адаптацией согласно изобретению получается именно желаемая скорость, тогда как при имитации без адаптации имитация дает слишком низкую скорость (ниже примерно на 9,5%). Это существенная разница, и она будет иметь большое влияние на то, останется ли пробка или исчезнет. Также можно видеть, что поскольку пробка при имитации с применением силы теряет больше жидкости, больше жидкости остается позади, что существенно влияет на рост волны позади пробки.

Пример 2

В этом примере выполнено больше имитаций, которые описаны в примере 1, но для разных скоростей смеси. Единственное отличие от примера 1 состоит в скорости смеси и времени в имитации до переключения с газа на жидкость, которое вычисляется как $9,45+100/U_{mix}$. Результаты были постобработаны аналогично примеру 1, обнаруживая вершину хвостовой части пробки на каждом временном шаге и вычисляя результирующую скорость.

На Фигуре 4 показаны отклонения между полученными и желаемыми скоростями пузыря Тейлора из имитаций с и без применения силы на левом и правом графике соответственно. Можно видеть, что в имитациях с применением силы отклонение обычно находится в пределах 0,5%, хотя при наибольшей скорости смеси отклонение составляет около 2%. Это намного меньше, чем отклонения, полученные без применения силы, где погрешность составляет примерно 9-13% (слишком низкая скорость).

Пример определения предварительно заданной скорости пузыря Тейлора с помощью аналитически сформулированной модели

В этом примере применяется аналитически сформулированную модель Bendiksen [4] для вычисления предварительно заданной скорости пузыря Тейлора, U_b , которая может быть обобщенно представлена как:

$$U_b = C_0 U_{mix} + U_0 \quad (14)$$

где:

$$\begin{array}{ll} C_0 & U_0 \\ 1,05 + 0,15 \sin(\theta)^2 & 0,351 \sin(\theta) \sqrt{gD} + 0,542 \cos(\theta) \sqrt{gD} \quad Fr_{mix} < 3,5 \\ 1,2 & 0,351 \sin(\theta) \sqrt{gD} \quad Fr_{mix} \geq 3,5 \end{array}$$

Здесь U_b - скорость пузыря Тейлора, U_{mix} - скорость смеси, U_0 - скорость дрейфа, а θ - наклон трубы. Fr_{mix} - число Фруда смеси, определенное как:

$$\frac{U_{mix}}{\sqrt{gD \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} \right)}} \quad (15)$$

ρ - плотность, g - гравитационное ускорение, а D - диаметр трубы. Для упрощения вычисления и достижения непрерывности U_b между уравнениями для двух чисел Фруда мы выбираем максимальное значение из двух.

Для нахождения скорости пузыря Тейлора для ячейки i в вычислительной модели мы используем скорость смеси, плотность и свойства трубы ячейки i в уравнении (14). Предположим, что значения в ячейке i на определенном временном шаге составляют: $\rho_l=1000$, $\rho_g=1$, $D=0,1$, $U_{mix}=3$, $\theta=0$ и $g=9,81$. Тогда уравнения для двух чисел Фруда дают следующие значения, большее из которых применяется CFD-моделью:

$$\begin{array}{ll} U_b = 1,05 \times 3 + 0,5368 = 3,6868 & Fr_{mix} < 3,5 \\ U_b = 1,2 \times 3 = 3,6 & Fr_{mix} \geq 3,5 \end{array}$$

Ссылки

1. Dukler, A.E. и M.G. Hubbard, «A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes», Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1975. 14(4): стр. 337-347.
2. Issa, R.I. и M.H.W. Kempf, «Simulation of slug flow in horizontal and nearly horizontal pipes with the two-fluid model», International Journal of Multiphase Flow, 2003. 29(1): стр. 69-95.
3. Sanderse, B., M. Haspels и R.A.W.M. Henkes, «Simulation of Elongated Bubbles in a Channel Using the Two-Fluid Model», Journal of Dispersion Science and Technology, 2015. 36(10): стр. 1407-1418.
4. Bendiksen, K. H. (1984). «An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes». International Journal of Multiphase Flow 10(4): 467-483.

5. Dumitrescu, D. (1943). «Strömung an Einer Luftblase im Senkrechten rohr» Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 23(3): 139-149.
6. Gokcal, B. (2008). An Experimental and Theoretical Investigation of Slug Flow for High Oil Viscosity in Horizontal Pipes. Талса, Университет Талсы, Оклахома. PhD: 146.
7. Jeyachandra, B. C., и др. (2012). «Drift-Velocity Closure Relationships for Slug Two-Phase High-Viscosity Oil Flow in Pipes». SPE Journal 17(2): 593-601.
8. Viana, F. и др. (2003). «Universal correlation for the rise velocity of long gas bubbles in round pipes». Journal of Fluid Mechanics 494: 379-398.
9. Cook M, Behnia M (2000) «Slug length prediction in near horizontal gas liquid intermittent flow». Chem Eng Sci 55:2009-2018.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Компьютерно-реализуемый способ для прогнозирования поведения текучей среды многофазного потока в трубопроводной транспортной системе, где поток содержит по меньшей мере одну газовую фазу и одну жидкую фазу, причем способ содержит:

применение одномерной (1D) модели вычислительной гидродинамики (CFD), описывающей геометрию интересующей секции трубопроводной транспортной системы и многофазного потока, текущего в ней, и

решение 1D CFD-модели для имитации поведения текучей среды многофазного потока в интересующей секции трубопроводной транспортной системы,

причем

1D CFD-модель применяет метод конечных объемов для решения модели, причем геометрия интересующей секции трубопроводной транспортной системы определяется как область вычислений, продолжающаяся вдоль оси, представленной декартовой координатой x , и разделенная на набор из N , где N - положительное целое число, не перекрывающихся конечных контрольных объемов, разделенных внутренней поверхностью между смежными конечными контрольными объемами,

отличающийся тем, что 1D CFD-модель выполнена с возможностью:

поиска и идентификации вершин хвостовых частей пробок в области вычислений, где вершина хвостовой части пробки определяется как конечный контрольный объем, имеющий долю газа менее 0,02, и расположенный вверх по потоку соседний конечный контрольный объем с долей газа более 0,02, и

определения, для каждой идентифицированной вершины хвостовой части пробки, области хвостовой части пробки, состоящей из вершины хвостовой части пробки и каждого конечного контрольного объема, лежащего в пределах расстояния L_{tail} , продолжающегося в направлении вверх по потоку от вершины хвостовой части пробки, где расстояние $L_{tail} = \Delta x \left(4 + \frac{1}{\Delta x^*} \right)$, где $\Delta x^* = 1$, если

$\frac{\Delta x}{D} \leq 15$, или $\Delta x^* = e^{\frac{\Delta x}{15D}} - 1$, если $\frac{\Delta x}{D} > 15$, а Δx - длина ячейки конечного контрольного объема,

и дополнительно отличающийся тем, что

1D CFD-модель для каждой идентифицированной области хвостовой части пробки дополнительно выполнена с возможностью применения корректировки

хвостовой части пробки, содержащей:

корректировку скорости газа для каждого конечного контрольного объема области хвостовой части пробки путем добавления в уравнение импульса газа силового члена $F(U_g^{n+1} - U_b) \cdot W$, где F - коэффициент силы, U_g^{n+1} - скорость газа на следующем временном шаге $n+1$, применяемая CFD-моделью, U_b - предварительно заданная скорость пузыря Тейлора, W - весовая функция, имеющая значение 1 для конечного контрольного объема на вершине хвостовой части пробки и значение между 0 и 1 для конечных контрольных объемов, лежащих в пределах расстояния L_{tail} , и где $F \geq 10 \cdot \max(|A_g|, |B_g/U_b|)$, где A_g и B_g получены путем преобразования адаптированного уравнения импульса газа в форму:

$$(A_g + F \cdot W) \cdot U_g^{n+1} = B_g + F \cdot W \cdot U_b$$

и

применение корректировки скорости жидкости для каждого конечного контрольного объема области хвостовой части пробки для соседней жидкой фазы текучей среды в контакте с газовой фазой многофазного потока путем вычитания из уравнения импульса для соседней жидкой фазы силового члена $F(U_g^{n+1} - U_b) \cdot W$.

2. Компьютерно-реализуемый способ по п. 1, в котором весовая функция W определяется посредством соотношения:

$$W = \text{MAX} \left(0; 0,5 \left(1 - \tanh \left(\frac{6L_i}{5 \frac{\Delta x}{D}} - 3 - \frac{1}{\Delta x^*} \right) \right) \right) \cdot \Psi(Fr)$$

где $\Psi(Fr) = 0,5(1 + \tanh(10(Fr - 0,5)))$, а $Fr = \frac{|U_{mix}|}{\sqrt{gD \cos(\theta) \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} \right)}}$

и где L_i - расстояние от i -го конечного контрольного объема области хвостовой части пробки до вершины хвостовой части пробки, g - гравитация, U_{mix} - общий объемный расход, деленный на площадь поперечного сечения трубы, θ - угол трубы, измеренный относительно горизонтальной плоскости, ρ_g - плотность газа, а ρ_l - среднее объемное значение плотностей одной или более жидкостей, находящихся в конечном контрольном объеме.

3. Компьютерно-реализуемый способ по п. 1 или 2, в котором предварительно заданную скорость пузыря Тейлора определяют с помощью

эмпирических измерений скоростей пузыря Тейлора, прогнозирования предварительно заданной скорости пузыря Тейлора с помощью прямых имитаций Навье-Стокса, или прогнозирования предварительно заданной скорости пузыря Тейлора с помощью аналитически сформулированной модели из литературы, такой как, например, модели Bendiksen [4], Dumitrescu [5], Gokcal [6], Jeyachandra и др. [7] или Viana и др. [8].

4. Компьютерно-реализуемый способ по любому из предыдущих пунктов, в котором предварительно заданную скорость пузыря Тейлора регулируют посредством соотношения:

$$U_b = U_{b,\infty} \left(1 + 0,56e^{-0,46 \frac{L_S}{D}} \right)$$

где $U_{b,\infty}$ - скорость пузыря Тейлора, который толкает длинную пробку, на которую не влияет эффект следа, D - внутренний диаметр трубы, а L_S - длина пробки перед пузырем Тейлора.

5. Компьютерно-реализуемый способ по любому из предыдущих пунктов, в котором 1D CFD-модель применяет подход улавливания пробок, при котором 1D уравнения многофазных потоков решаются на сетке с $\Delta x \leq 10 \cdot D$, где Δx - длина ячейки конечного контрольного объема интересующей секции, а D - внутренний диаметр трубопровода интересующей секции.

6. Способ для оптимизации конструкции проектного решения трубопроводной системы транспортировки текучей среды для транспортировки многофазного потока текучей среды, причем способ содержит:

- подготовку по меньшей мере двух разных конструкций системы транспортировки текучей среды,

- применение компьютерно-реализуемого способа по любому из пп. 1-5 для прогнозирования поведения текучей среды в каждой из по меньшей мере двух разных конструкций и

- применение спрогнозированного поведения текучей среды для определения оптимизированной конструкции системы транспортировки текучей среды.

7. Способ по п. 6, в котором оптимизация конструкции трубопроводной системы транспортировки текучей среды оценивает влияние на поведение текучей среды изменения одного или более факторов, выбранных из: диаметра трубопровода, траектории трубопровода на местности, количества насосов для поддержания давления, их местоположения и эффекта повышения давления,

количества дроссельных клапанов, их местоположения и эффекта уменьшения объема потока с целью экономии капитальных вложений и эксплуатационных затрат путем идентификации оптимальных физических размеров и/или траектории на местности труб транспортной системы без ущерба для стабильности поведения текучей среды и пропускной способности.

8. Способ по п. 6 или 7, в котором оптимизация конструкции трубопроводной системы транспортировки текучей среды применяет сымитированные размеры пробок и частоту пробок для оптимизации размера приемных установок, таких как пробкоуловитель и/или пробкоотделитель.

9. Способ по любому из пп. 6-8, в котором оптимизация конструкции трубопроводной системы транспортировки текучей среды применяет сымитированные размеры пробок и частоту пробок для оценки сил, воздействующих на изгибы труб и пролеты трубопровода в трубопроводной системе транспортировки текучей среды.

10. Способ для поиска и устранения проблем потока во время работы трубопроводной системы транспортировки текучей среды для транспортировки многофазного потока текучей среды, причем способ содержит:

- применение компьютерно-реализуемого способа по любому из пп. 1-5, в который загружена область вычислений, характерная для транспортной системы, имеющей проблемы с потоком, и входные данные характеристик потока в системе транспортировки, для прогнозирования влияния на поведение текучей среды в транспортной системе возможных действий по уменьшению воздействия и

- применение спрогнозированных поведений текучей среды для определения, какое действие по уменьшению воздействия должно быть физически реализовано в транспортной системе, имеющей проблемы с потоком.

11. Способ по п. 10, в котором поиск и устранение проблем потока во время работы трубопроводной системы транспортировки текучей среды содержит прогнозирование влияния на поведение текучей среды в транспортной системе действий по уменьшению воздействия, таких как регулирование объемов потока в транспортной системе, надводное дросселирование и/или применение газлифта.

12. Компьютерная программа, содержащая инструкции обработки, которые заставляют компьютер выполнять способ по любому из пп. 1-5, когда инструкции исполняются устройством обработки в компьютере.

13. Компьютер, содержащий устройство обработки и память компьютера, которая хранит компьютерную программу по п. 12.

14. Автономная система управления потоком (100), содержащая:

- блок имитации потока (30),

- конфигурацию датчиков, содержащую по меньшей мере первый датчик (51), расположенный на расположенном вверх по потоку конце (11), и второй датчик (51), расположенный на расположенном вниз по потоку конце (12) трубопроводной транспортной системы (10), и измеряющую один или более отличительных параметров потока многофазной текучей среды, текущей через трубопроводную транспортную систему (10),

- конфигурацию актуаторов, содержащую по меньшей мере один актуатор (61), выполненный с возможностью регулирования потока текучей среды через трубопроводную транспортную систему (10), и

- блок управления (20), выполненный с возможностью:

- приема сигналов (53, 54) от конфигурации датчиков, измеряющей один или более отличительных параметров потока, и преобразования сигналов в одно или более граничных условий (21), передаваемых в блок имитации потока (30), и

- приема результатов имитации (32) от блока имитации потока (30) и преобразования результатов имитации в установочные значения (22), передаваемые в актуатор(ы) (61) конфигурации актуаторов, причем

- блок имитации потока (30) содержит компьютер, в который загружено программное обеспечение, которое при исполнении выполняет компьютерно-реализуемый способ, имитирующий поведение текучей среды многофазного потока, текущего в трубопроводной транспортной системе (10), с граничным(и) условием(ями) (21) от блока управления (20),

- отличающаяся тем, что

- программное обеспечение компьютера блока имитации потока (30) представляет собой компьютерную программу по п. 12.

15. Автономная система управления потоком по п. 14, причем система управления потоком дополнительно содержит второй актуатор (62), расположенный на расположенном вниз по потоку конце (12) трубопроводной транспортной системы (10), и/или третий актуатор, расположенный в любом месте между расположенном вверх по потоку (11) и расположенном вниз по потоку (12) концом трубопроводной транспортной системы (10).

16. Автономная система управления потоком по п. 14 или 15, в которой блок

управления (20) представляет собой распределенную систему управления, контроллер с программируемой логикой, граничный шлюз, систему SCADA, систему Historian или базу данных временных рядов, реализуемые для покрытия уровней автоматизации 0, 1, и 2 согласно стандарту: ANSI/ISA-95.00.01-2010 (IEC 62264-1 Mod) Интеграция системы управления предприятием, Часть 1: Модели и терминология.

17. Автономная система управления потоком по любому из пп. 14-16, в которой первый датчик (51) конфигурации датчиков системы управления потоком содержит датчик температуры, расположенный на расположенном вверх по потоку конце (11) трубопроводной транспортной системы (10), и

любое из:

- первый датчик (51) дополнительно содержит датчик давления и второй датчик (52) содержит датчик давления,

- первый датчик (51) дополнительно содержит датчик давления и второй датчик (52) содержит датчик потока,

- первый датчик (51) дополнительно содержит датчик потока и второй датчик (52) содержит датчик давления

или

- первый датчик (51) дополнительно содержит датчик потока и второй датчик (52) содержит датчик потока.

18. Автономная система управления потоком по любому из пп. 14-17, в которой блок управления (20) определяет установочные значения посредством использования одного или нескольких следующих алгоритмов: контур ПИД-управления, предварительно обученный алгоритм машинного обучения и/или алгоритм поиска глобального или локального оптимума.

19. Автономная система управления потоком по любому из пп. 14-17, в которой актуатор (61, 62) конфигурации актуаторов представляет собой управляющий клапан, барабан-сепаратор, компрессор, газовый инжектор или насос.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Компьютерно-реализуемый способ для прогнозирования поведения текучей среды многофазного потока в трубопроводной транспортной системе, где поток содержит по меньшей мере одну газовую фазу и одну жидкую фазу, причем способ содержит:

применение одномерной (1D) модели вычислительной гидродинамики (CFD), описывающей геометрию интересующей секции трубопроводной транспортной системы и многофазного потока, текущего в ней, и

решение 1D CFD-модели для имитации поведения текучей среды многофазного потока в интересующей секции трубопроводной транспортной системы,

причем

1D CFD-модель применяет метод конечных объемов для решения модели, причем геометрия интересующей секции трубопроводной транспортной системы определяется как область вычислений, продолжающаяся вдоль оси, представленной декартовой координатой x , и разделенная на набор из N , где N - положительное целое число, не перекрывающихся конечных контрольных объемов, разделенных внутренней поверхностью между смежными конечными контрольными объемами,

отличающийся тем, что 1D CFD-модель выполнена с возможностью:

поиска и идентификации вершин хвостовых частей пробок в области вычислений, где вершина хвостовой части пробки определяется как конечный контрольный объем, имеющий долю газа менее 0,02, и расположенный вверх по потоку соседний конечный контрольный объем с долей газа более 0,02, и

определения, для каждой идентифицированной вершины хвостовой части пробки, области хвостовой части пробки, состоящей из вершины хвостовой части пробки и каждого конечного контрольного объема, лежащего в пределах расстояния L_{tail} , продолжающегося в направлении вверх по потоку от вершины хвостовой части пробки, где расстояние $L_{tail} = \Delta x \left(4 + \frac{1}{\Delta x^*} \right)$, где $\Delta x^* = 1$, если $\frac{\Delta x}{D} \leq 15$, или $\Delta x^* = e^{\frac{\Delta x}{15D}} - 1$, если $\frac{\Delta x}{D} > 15$, D - внутренний диаметр интересующей секции трубопроводной транспортной системы, а Δx - длина ячейки конечного контрольного объема,

и дополнительно отличающийся тем, что

1D CFD-модель для каждой идентифицированной области хвостовой части

пробки дополнительно выполнена с возможностью применения корректировки хвостовой части пробки, содержащей:

корректировку скорости газа для каждого конечного контрольного объема области хвостовой части пробки путем добавления в уравнение импульса газа силового члена $F(U_g^{n+1} - U_b) \cdot W$, где F - коэффициент силы, U_g^{n+1} - скорость газа на следующем временном шаге $n+1$, применяемая CFD-моделью, U_b - предварительно заданная скорость пузыря Тейлора, W - весовая функция, имеющая значение 1 для конечного контрольного объема на вершине хвостовой части пробки и значение между 0 и 1 для конечных контрольных объемов, лежащих в пределах расстояния L_{tail} , и где $F \geq 10 \cdot \max(|A_g|, |B_g/U_b|)$, где A_g и B_g получены путем преобразования адаптированного дискретизированного уравнения импульса газа так, что все члены, умноженные на U_g^{n+1} , размещены в левой части, а остальные члены размещены в правой части, чтобы дать адаптированное дискретизированное уравнение импульса газа в форме:

$$(A_g + F \cdot W) \cdot U_g^{n+1} = B_g + F \cdot W \cdot U_b$$

и

применение корректировки скорости жидкости для каждого конечного контрольного объема области хвостовой части пробки для соседней жидкой фазы текучей среды в контакте с газовой фазой многофазного потока путем вычитания из уравнения импульса для соседней жидкой фазы силового члена $F(U_g^{n+1} - U_b) \cdot W$.

2. Компьютерно-реализуемый способ по п. 1, в котором весовая функция W определяется посредством соотношения:

$$W = \text{MAX} \left(0; 0,5 \left(1 - \tanh \left(\frac{6L_i}{5\Delta x} - 3 - \frac{1}{\Delta x^*} \right) \right) \right) \cdot \Psi(Fr)$$

где $\Psi(Fr) = 0,5(1 + \tanh(10(Fr - 0,5)))$, а $Fr = \frac{|U_{mix}|}{\sqrt{gD \cos(\theta) \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} \right)}}$

и где L_i - расстояние от i -го конечного контрольного объема области хвостовой части пробки до вершины хвостовой части пробки, g - гравитация, U_{mix} - общий объемный расход, деленный на площадь поперечного сечения трубы, θ - угол трубы, измеренный относительно горизонтальной плоскости, ρ_g - плотность газа, а ρ_l - среднее объемное значение плотностей одной или более жидкостей,

находящихся в конечном контрольном объеме.

3. Компьютерно-реализуемый способ по п. 1 или 2, в котором предварительно заданную скорость пузыря Тейлора определяют с помощью эмпирических измерений скоростей пузыря Тейлора, прогнозирования предварительно заданной скорости пузыря Тейлора с помощью прямых имитаций Навье-Стокса, или прогнозирования предварительно заданной скорости пузыря Тейлора с помощью аналитически сформулированной модели из литературы, такой как, например, модели Bendiksen [4], Dumitrescu [5], Gokcal [6], Jeyachandra и др. [7] или Viana и др. [8].

4. Компьютерно-реализуемый способ по любому из предыдущих пунктов, в котором предварительно заданную скорость пузырей Тейлора регулируют посредством соотношения:

$$U_b = U_{b,\infty} \left(1 + 0,56e^{-0,46\frac{L_S}{D}} \right)$$

где $U_{b,\infty}$ - скорость пузыря Тейлора, который толкает длинную пробку, на которую не влияет эффект следа, а L_S - длина пробки перед пузырем Тейлора.

5. Компьютерно-реализуемый способ по любому из предыдущих пунктов, в котором 1D CFD-модель применяет подход улавливания пробок, при котором 1D уравнения многофазных потоков решаются на сетке с $\Delta x \leq 10 \cdot D$, где Δx - длина ячейки конечного контрольного объема интересующей секции.

6. Способ для оптимизации конструкции проектного решения трубопроводной системы транспортировки текучей среды для транспортировки многофазного потока текучей среды, причем способ содержит:

- подготовку по меньшей мере двух разных конструкций системы транспортировки текучей среды,

- применение компьютерно-реализуемого способа по любому из пп. 1-5 для прогнозирования поведения текучей среды в каждой из по меньшей мере двух разных конструкций и

- применение спрогнозированного поведения текучей среды для определения оптимизированной конструкции системы транспортировки текучей среды.

7. Способ по п. 6, в котором оптимизация конструкции трубопроводной системы транспортировки текучей среды оценивает влияние на поведение текучей среды изменения одного или более факторов, выбранных из: диаметра трубопровода, траектории трубопровода на местности, количества насосов для

поддержания давления, их местоположения и эффекта повышения давления, количества дроссельных клапанов, их местоположения и эффекта уменьшения объема потока с целью экономии капитальных вложений и эксплуатационных затрат путем идентификации оптимальных физических размеров и/или траектории на местности труб транспортной системы без ущерба для стабильности поведения текучей среды и пропускной способности.

8. Способ по п. 6 или 7, в котором оптимизация конструкции трубопроводной системы транспортировки текучей среды применяет симитированные размеры пробок и частоту пробок для оптимизации размера приемных установок, таких как пробкоуловитель и/или пробкоотделитель.

9. Способ по любому из пп. 6-8, в котором оптимизация конструкции трубопроводной системы транспортировки текучей среды применяет симитированные размеры пробок и частоту пробок для оценки сил, воздействующих на изгибы труб и пролеты трубопровода в трубопроводной системе транспортировки текучей среды.

10. Способ для поиска и устранения проблем потока во время работы трубопроводной системы транспортировки текучей среды для транспортировки многофазного потока текучей среды, причем способ содержит:

- применение компьютерно-реализуемого способа по любому из пп. 1-5, в который загружена область вычислений, характерная для транспортной системы, имеющей проблемы с потоком, и входные данные характеристик потока в системе транспортировки, для прогнозирования влияния на поведение текучей среды в транспортной системе возможных действий по уменьшению воздействия и

- применение спрогнозированных поведений текучей среды для определения, какое действие по уменьшению воздействия должно быть физически реализовано в транспортной системе, имеющей проблемы с потоком.

11. Способ по п. 10, в котором поиск и устранение проблем потока во время работы трубопроводной системы транспортировки текучей среды содержит прогнозирование влияния на поведение текучей среды в транспортной системе действий по уменьшению воздействия, таких как регулирование объемов потока в транспортной системе, надводное дросселирование и/или применение газлифта.

12. Компьютерная программа, содержащая инструкции обработки, которые заставляют компьютер выполнять способ по любому из пп. 1-5, когда инструкции исполняются устройством обработки в компьютере.

13. Компьютер, содержащий устройство обработки и память компьютера,

которая хранит компьютерную программу по п. 12.

14. Автономная система управления потоком (100), содержащая:

- блок имитации потока (30),

- конфигурацию датчиков, содержащую по меньшей мере первый датчик (51), расположенный на расположенном вверх по потоку конце (11), и второй датчик (51), расположенный на расположенном вниз по потоку конце (12) трубопроводной транспортной системы (10), и измеряющую один или более отличительных параметров потока многофазной текучей среды, текущей через трубопроводную транспортную систему (10),

- конфигурацию актуаторов, содержащую по меньшей мере один актуатор (61), выполненный с возможностью регулирования потока текучей среды через трубопроводную транспортную систему (10), и

- блок управления (20), выполненный с возможностью:

- приема сигналов (53, 54) от конфигурации датчиков, измеряющей один или более отличительных параметров потока, и преобразования сигналов в одно или более граничных условий (21), передаваемых в блок имитации потока (30), и

- приема результатов имитации (32) от блока имитации потока (30) и преобразования результатов имитации в установочные значения (22), передаваемые в актуатор(ы) (61) конфигурации актуаторов,

причем

- блок имитации потока (30) содержит компьютер, в который загружено программное обеспечение, которое при исполнении выполняет компьютерно-реализуемый способ, имитирующий поведение текучей среды многофазного потока, текущего в трубопроводной транспортной системе (10), с граничным(и) условием(ями) (21) от блока управления (20),

отличающаяся тем, что

программное обеспечение компьютера блока имитации потока (30) представляет собой компьютерную программу по п. 12.

15. Автономная система управления потоком по п. 14, причем система управления потоком дополнительно содержит второй актуатор (62), расположенный на расположенном вниз по потоку конце (12) трубопроводной транспортной системы (10), и/или третий актуатор, расположенный в любом месте между расположенном вверх по потоку (11) и расположенном вниз по потоку (12) концом трубопроводной транспортной системы (10).

16. Автономная система управления потоком по п. 14 или 15, в которой блок управления (20) представляет собой распределенную систему управления, контроллер с программируемой логикой, граничный шлюз, систему SCADA, систему Historian или базу данных временных рядов, реализуемые для покрытия уровней автоматизации 0, 1, и 2 согласно стандарту: ANSI/ISA-95.00.01-2010 (IEC 62264-1 Mod) Интеграция системы управления предприятием, Часть 1: Модели и терминология.

17. Автономная система управления потоком по любому из пп. 14-16, в которой первый датчик (51) конфигурации датчиков системы управления потоком содержит датчик температуры, расположенный на расположенном вверх по потоку конце (11) трубопроводной транспортной системы (10), и

любое из:

- первый датчик (51) дополнительно содержит датчик давления и второй датчик (52) содержит датчик давления,

- первый датчик (51) дополнительно содержит датчик давления и второй датчик (52) содержит датчик потока,

- первый датчик (51) дополнительно содержит датчик потока и второй датчик (52) содержит датчик давления

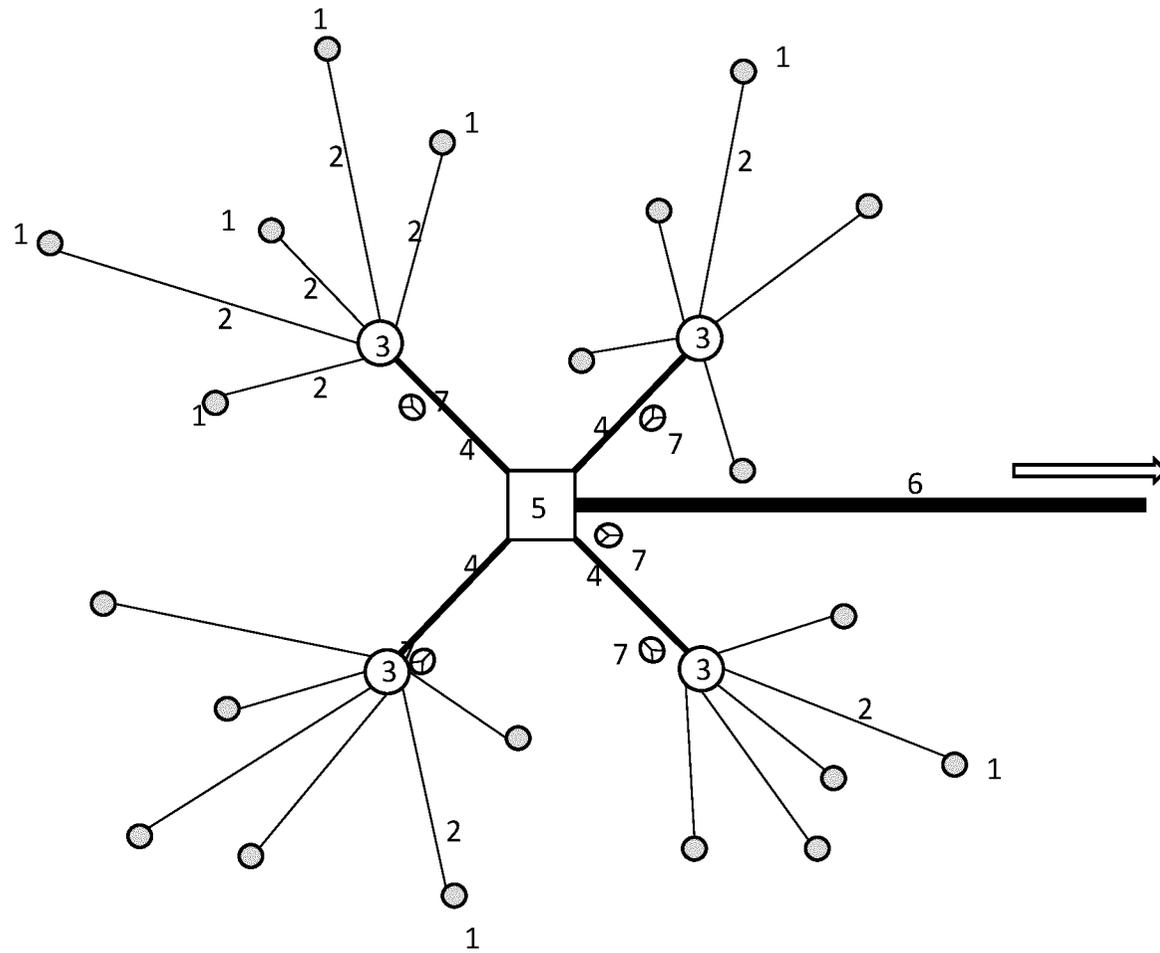
или

- первый датчик (51) дополнительно содержит датчик потока и второй датчик (52) содержит датчик потока.

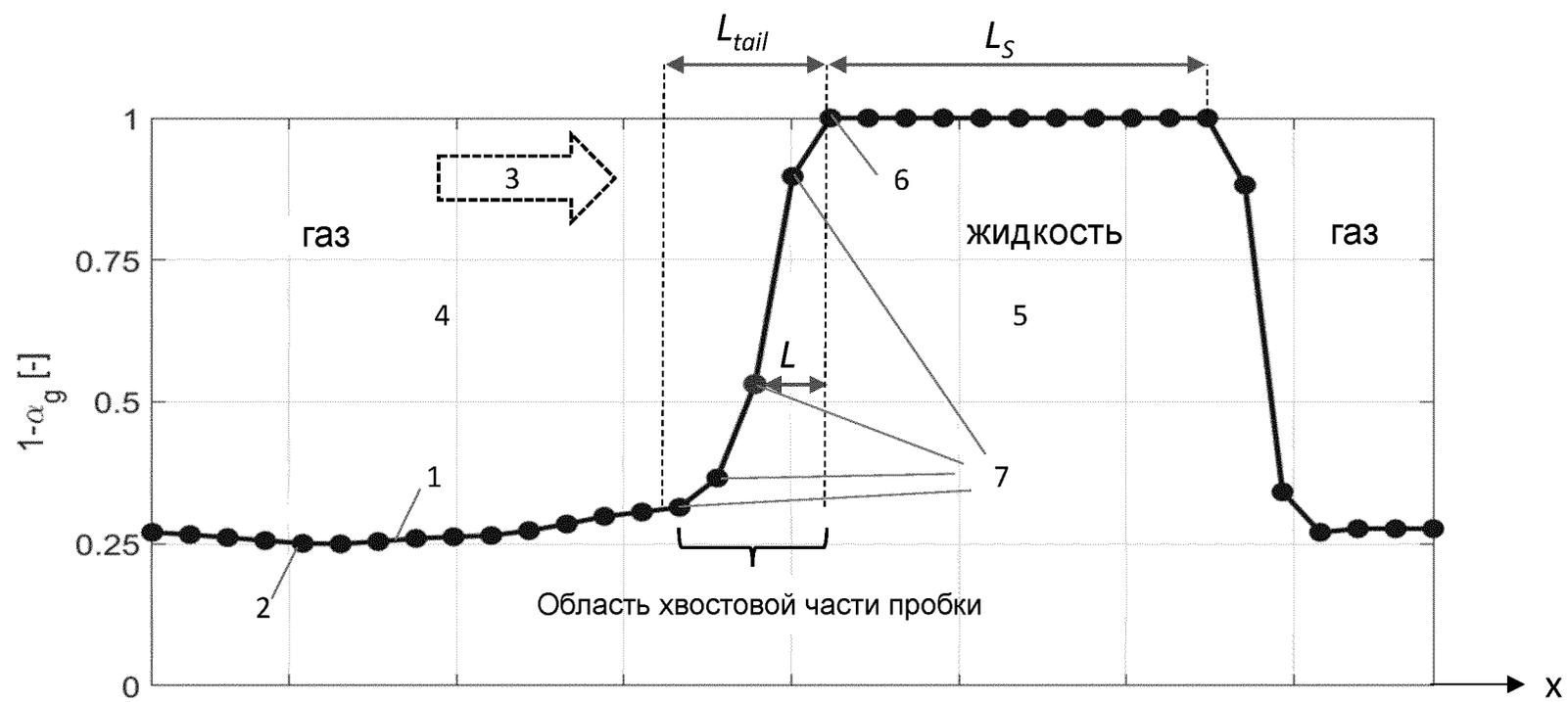
18. Автономная система управления потоком по любому из пп. 14-17, в которой блок управления (20) определяет установочные значения посредством использования одного или нескольких следующих алгоритмов: контур ПИД-управления, предварительно обученный алгоритм машинного обучения и/или алгоритм поиска глобального или локального оптимума.

19. Автономная система управления потоком по любому из пп. 14-17, в которой актуатор (61, 62) конфигурации актуаторов представляет собой управляющий клапан, барабан-сепаратор, компрессор, газовый инжектор или насос.

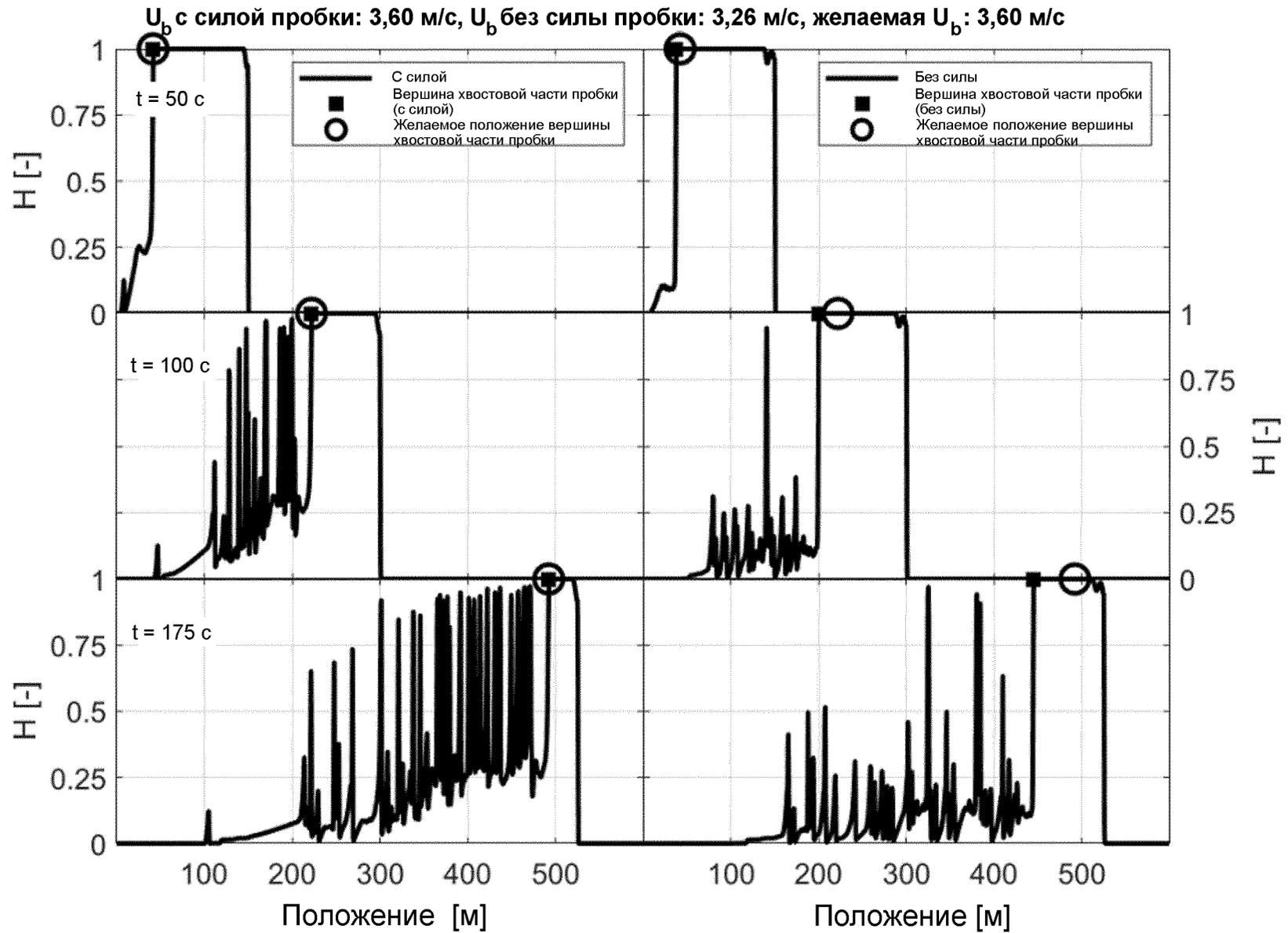
1/6



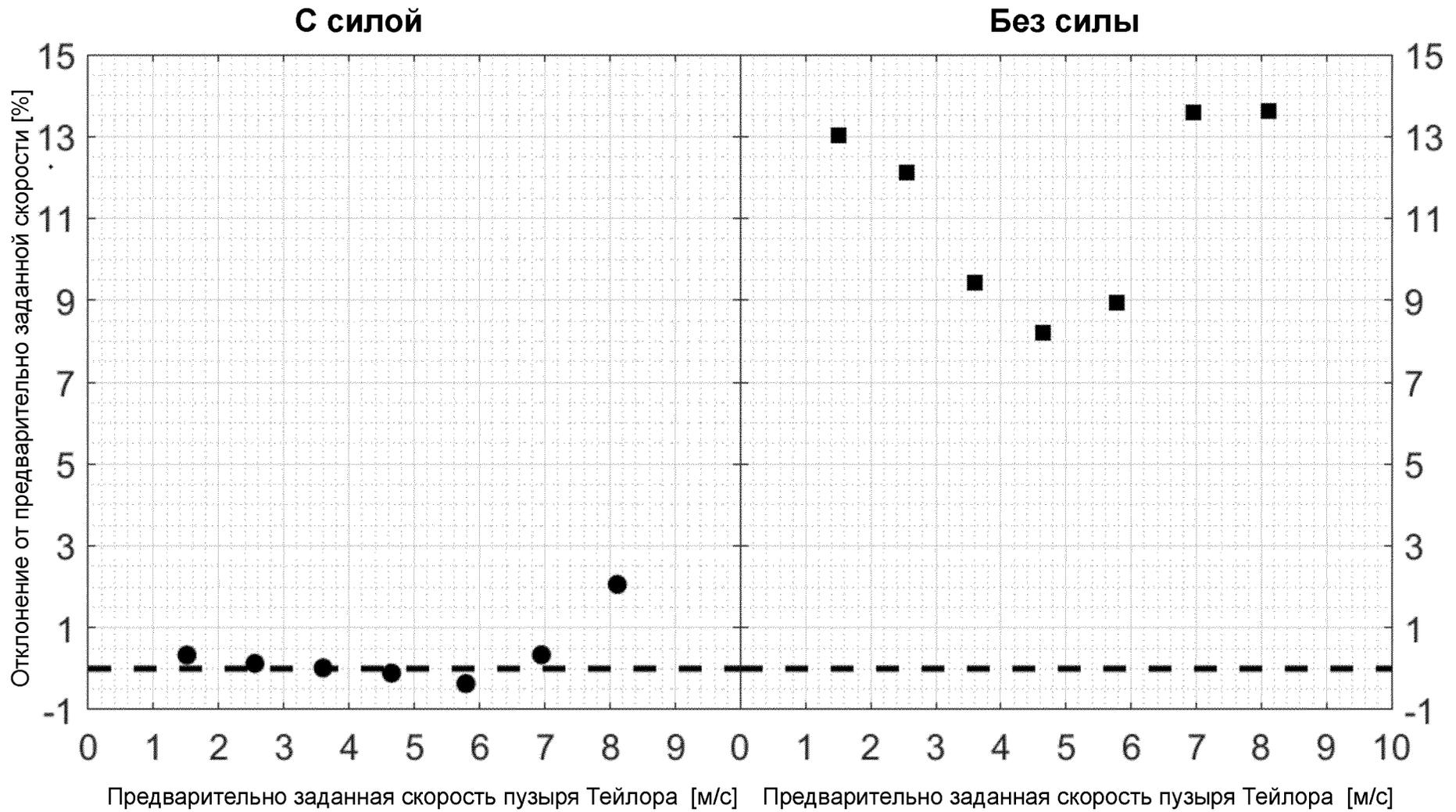
Фигура 1



Фигура 2

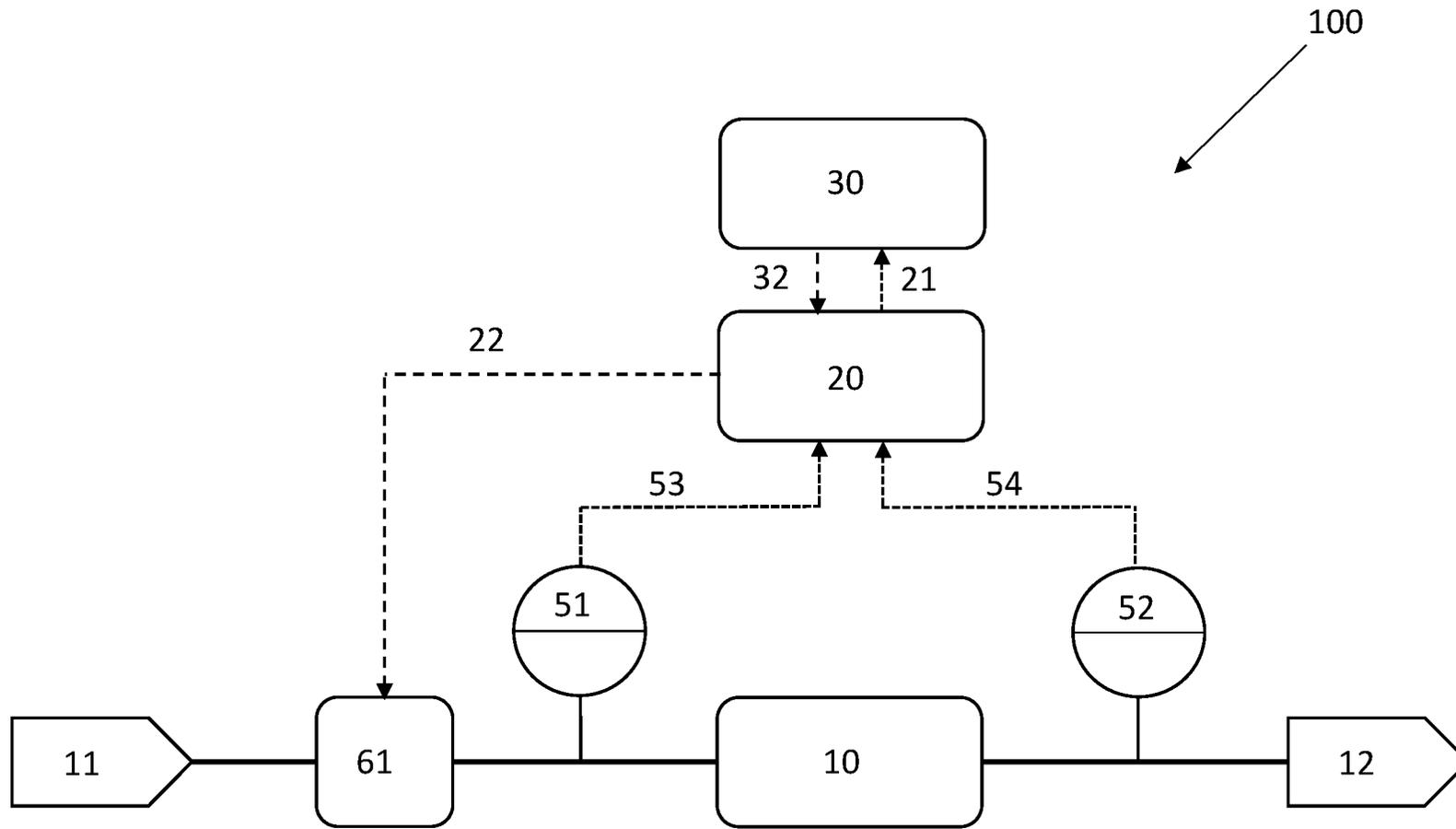


Фигура 3



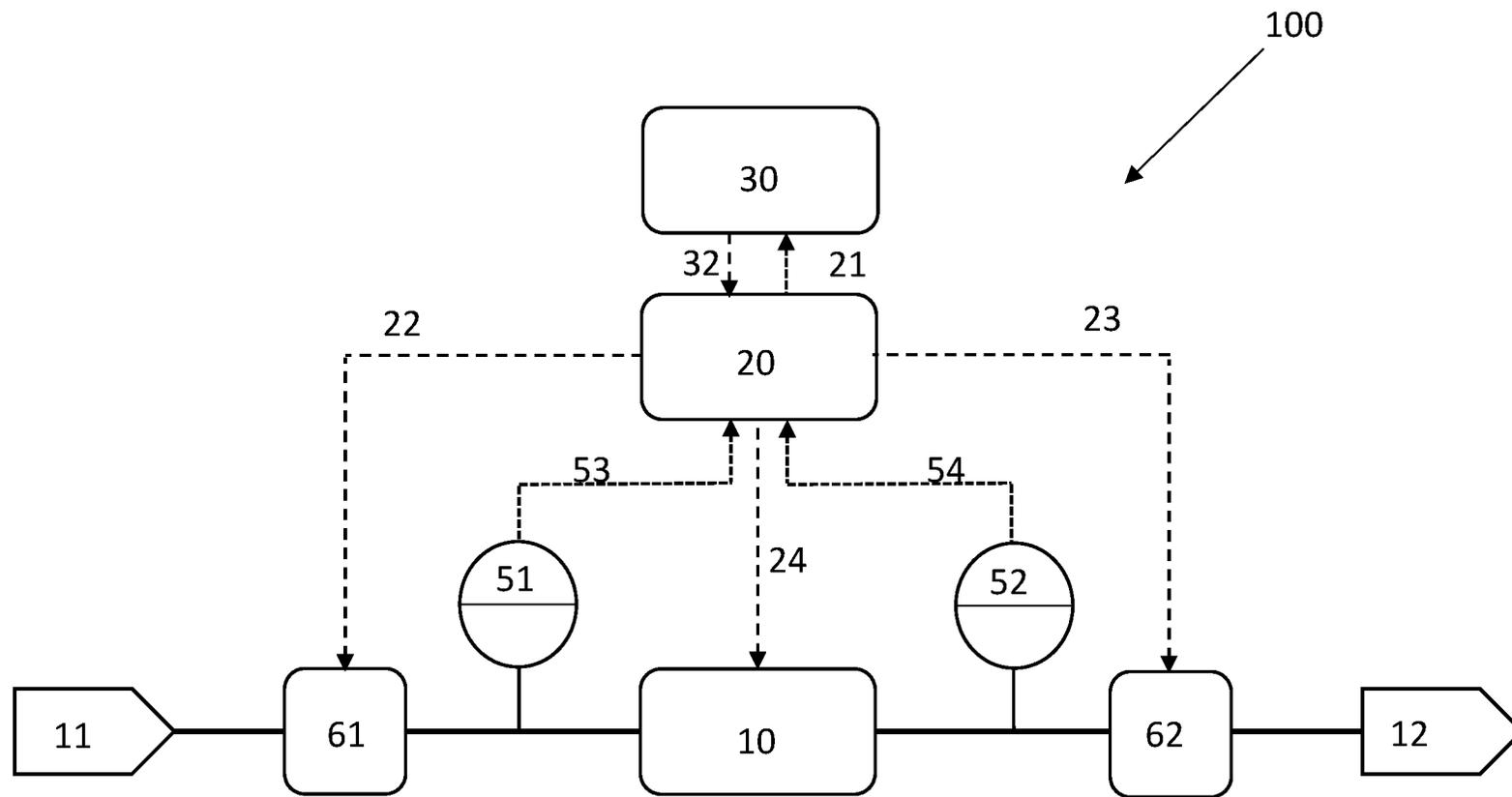
Фигура 4

5/6



Фигура 5

6/6



Фигура 6