

Численное моделирование осаждения твердых примесей в нефтепроводе



В.П. Жаворонкин
/Научно-технический
центр "Алгоритм" ,
г. Самара,
info@ntc-algorithm.ru /



Д.В. Гусев
/Компания CFDgroup,
г. Москва,
info@cfddgroup.ru/

ВВЕДЕНИЕ

Проблема наличия попутных твердых примесей в потоке нефти существует практически на каждой стадии ее добычи, переработки и транспортировки. В качестве примеси могут выступать вещества как естественные - песок, парафины, смолы, так и сформированные под воздействием технологических параметров транспортировки, например, газовые гидраты. В ряде случаев частицы примеси могут обладать повышенной адгезионной активностью, что приводит к их флокуляции по мере движения; в этом случае частицы образуют миллиметровые агрегаты (при микронном размере исходных частиц) и тем самым усиливают свое воздействие на несущий поток.

Попав в трубопровод, твердые частицы переносятся непрерывной фазой (нефть, газ, вода и др.) и по мере передвижения претерпевают неупругие столкновения друг с другом и со стеной трубопровода, теряя энергию, замедляясь. Диссипация энергии твердой фазы приводит к последующему замедлению основной фазы, что вызывает увеличение перепада давления, требуемого для поддержа-

ния необходимого расхода. В некоторых случаях перепад, необходимый для преодоления трения многофазной пульпы, существенно превышает возможности используемых побудителей расхода. При таком сценарии развития процесса в трубопроводе образуется застойная зона, в которой флокуляция частиц и межфазные химические реакции интенсифицируются, образуя твердую пробку в этой зоне. Сходное явление широко рассматривается в ряде медицинских работ по стенозису кровеносных сосудов.

В данной работе мы рассмотрим процесс отложения липких частиц в турбулентном потоке несущей среды. Для этой цели будет использована виртуальная гидродинамическая модель трубопровода, которая численно решает базовые уравнения динамики многофазных потоков.

МЕТОДОЛОГИЯ

Гидродинамическое моделирование однофазного течения сводится к численному решению уравнений Навье-Стокса в заданной геометрии, предварительно разбитой на дискретные контрольные элементы. Мо-

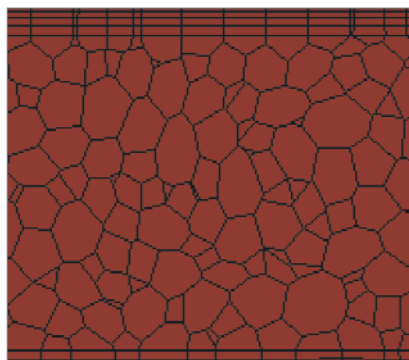


Рис. 1. Расчетная сетка CAD-модели трубопровода. Разрез в продольном сечении

делирование второй фазы, которая в некоторых случаях определяется как дисперсная, классически может осуществляться с помощью двух различных подходов: Лагранжа и Эйлера. В первом случае каждая частица второй фазы моделируется как независимое тело, взаимодействующее с несущей средой через силу лобового сопротивления, а также с другими телами и стенкой путем применения механистической модели столкновений. Достоинством лагранжевого метода обработки дисперсной фазы являются всеобщая детализация процесса по каждой частице, прямой доступ к физике частиц. Однако реальные промышленные процессы включают миллиарды микронных и субмикронных частиц, обработка которых поименно приводит к огромному увеличению требуемых вычислительных мощностей. Эйлера подход к обработке второй фазы заключается в ее описании дополнительной системой уравнений Навье-Стокса, в то время как взаимодействие дисперсной среды с несущей и внутренние соударения представлены дополнительными усредненными напряжениями. Вычислительные затраты при использовании метода Эйлера на порядки ниже, что делает его более доступным для инженерных приложений вычислительной гидродинамики. В данной работе использован метод Эйлера, который включает уравнения фазового баланса по расчетной ячейке, неразрывности и импульсов (для изотермического процесса):

$$\sum_{m=1}^h \varphi_m = 1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\varphi_m \rho_m)}{\partial t} + \nabla(\varphi_m \rho_m \vec{u}_m) = 0 \quad (2)$$

где φ - объемная доля соответствующей фазы, ρ - ее плотность, u - скорость, а индекс m обозначает фазу ("l" для жидкой и "s" для твердой).

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varphi_m \rho_m \vec{u}_m)}{\partial t} + \nabla(\varphi_m \rho_m \vec{u}_m \vec{u}_m) = \\ = -\varphi_m \nabla p + \rho_m \varphi_m \vec{g} + \nabla \varphi_m (\underline{\tau}_m + \underline{\tau}_m^i) + \\ + \vec{M}_m + \vec{F}_{A,m} + \delta_{m,h} \vec{F}_{int,h} \end{aligned} \quad (3)$$

где p - давление, g - ускорение свободного падения, τ и τ_i - тензоры вязкого и турбулентного напряжения.

Импульсы межфазного взаимодействия равны и противоположно направлены: $M_l = -M_s$, они представлены силой лобового сопротивления частиц потоку среды. Архимедовы межфазные силы также равны по абсолютной величине и противоположно направлены: $F_{A,l} = -F_{A,s}$. Напряжение, образующееся в результате столкновений частиц и предотвращающее их стопроцентное уплотнение при осаждении, представлено в форме $F_{int,s}$:

$$F_{int,s} = e^{-580\varphi_{s,lim} - \varphi_s} \nabla \varphi_s \quad (4)$$

с плотноупакованным пределом $\varphi_{s,lim} = 0,63$.

Взаимодействие твердой фазы со стенкой трубопровода моделируется внутри тензора вязкого напряжения τ , модифицируя вязкость каждой фазы в соответствии с корреляцией

$$\mu_s = \mu_l = \mu_c \left(1 - \frac{\varphi_s}{\varphi_{s,lim}}\right)^{2,5}, \quad (5)$$

где μ - динамическая вязкость, а индекс "c" обозначает вязкость несущей среды без примесей.

Турбулентное напряжение задавалось моделью турбулентности типа "к-эпси-

лон", решающей два дополнительных скалярных уравнения переноса для турбулентной кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε . Соответствующие уравнения переноса не приведены в данной работе и могут быть предоставлены авторами по запросу.

Слипание частиц моделировалось в соответствии с работой Мюле [3], в котором диаметр агрегата в динамической системе представлен как функция параметров турбулентности, а также силы притяжения между частицами $F = 10 nH$:

$$d_s = \left(\frac{F(d_1)^{2-f_r}}{\mu_l \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho_l}}} \right)^{\frac{1}{4-f_r}}, \quad (6)$$

где $d_l = 10$ мкм - диаметр исходной неагломерированной частицы, $f_r = 2,2$ - фрактальный размер агломерата. Диаметр частицы, рассчитанный в соответствии с уравнением (6), используется для расчета импульса межфазного взаимодействия M_m .

Система уравнений (1)-(3), а также два уравнения для скаляров модели турбулентности дискретизируются на многогранных конечных объемах с пристенным регулярным слоем для стандартных пристеночных функций модели "к-эпсилон" (рис. 1).

Граничные условия модели включают стандартные inlet и outlet, основанные на сохранении массового расхода, а также нескользкую стенку по несущей среде и скользкую по твердой фазе. Остальные константы процесса приведены в табл. 1.

Дискретизированные уравнения (1)-(3) решаются численно по неявной

Таблица

Параметры процесса

Параметр	Несущая среда	Твердая фаза
плотность, кг/м ³	800	1000
вязкость, Пас	Уравнение 5	Уравнение 5
скорость вход., м/с	0,1	0,1
объемная доля на входе	0,95	0,05
давление, Па	100 000	----
диаметр трубы, мм		30

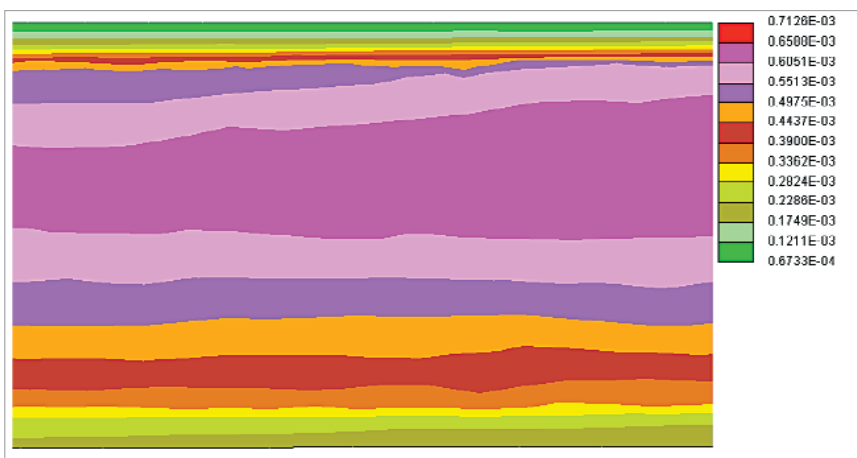


Рис. 2. Распределение диаметров частиц в продольном сечении трубопровода

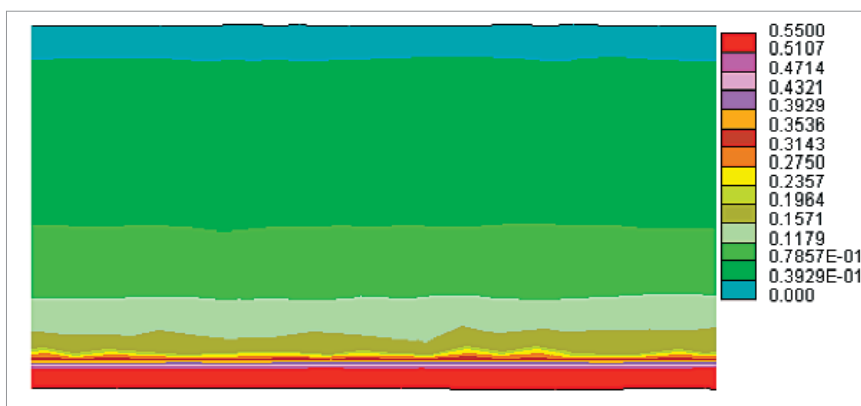


Рис. 3. Распределение объемной доли твердой фазы в продольном сечении трубопровода

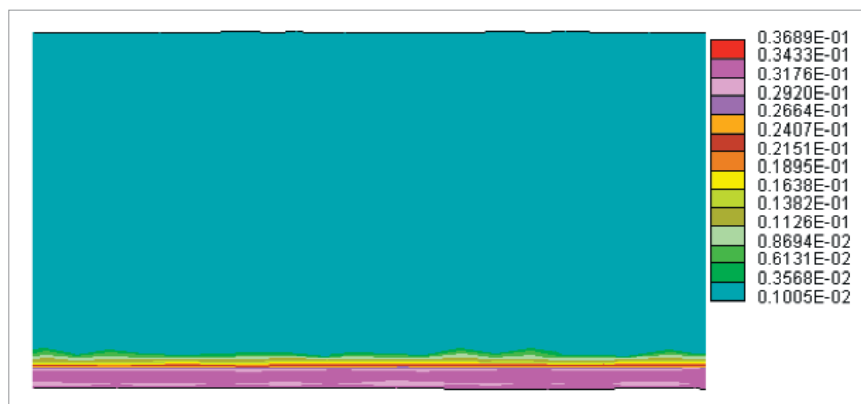


Рис. 4. Вязкость многофазной пульпы в продольном сечении трубопровода, Пас

схеме Патанкара SIMPLE [4] с использованием среды OpenFoam.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование проводилось итерационно с критерием сходимости 10-12 по каждому из базовых уравнений процесса. На рис. 2 показан контурный график диаметров частиц в про-

дольном сечении трубопровода. Он иллюстрирует пространственное распределение интенсивности флокуляции частиц в турбулентном потоке, где наибольший диаметр достигается в ядре потока за счет коллокальности с максимумом интенсивности межчастичных столкновений. В обратную сторону минимум диаметра наблюдается

в пристеночной области, поскольку наибольшие абсолютные значения гидродинамических сил, ответственных за фрагментацию агрегата, позиционированы в пристеночной области, где ϵ , в свою очередь, достигает максимума.

Таким образом, осаждение частиц начинается в ядре потока и формирует обструкционный участок в нижней части трубопровода, что показано на рис. 3 в терминах контуров объемной доли твердой фазы в продольном сечении трубопровода.

Как следует из рис. 3, результирующий депозит содержит в 11 раз больше частиц, чем на входе, и существенно увеличивает вязкость в сформированном псевдожидком слое. Контурный график вязкости пульпы представлен на рис. 4.

Как уже было сказано выше, увеличение вязкости многофазной среды приводит к уменьшению ее скорости в районе обструкции (рис. 5). Радиальный профиль скоростей становится существенно отличным от классической параболы, формируя локально ускоренную зону в верхней части трубопровода (примерно в 3 раза больше входного значения) и застойную зону в нижней части. Векторы скорости несущей среды, показанные на рис. 5, позволяют сделать вывод о наличии обратного направленных конвекционных нестабильностей в депозите, вызванных межчастичными столкновениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная вычислительная модель может использоваться для моделирования осаждения твердых примесей в трубопроводе на стадии рабочего проектирования, что позволяет предусмотреть превентивные технические решения по предупреждению заторообразования в нефтепроводах. Определение критических "узких мест" на стадии проектировании трубопровода позволит избежать дополнительных затрат и снизит вероятность аварий, сократит длительность простоев либо полностью избавит от них при условии принятия правильных технических решений. Таких решений



Рис. 5. Скорость несущей среды при наличии обструкции в продольном сечении трубопровода, м/с

В представленной работе рассмотрен пример с линейным участком нефтепровода, но несложно догадаться, что точно такие же процессы происходят, например, в колене нефтепровода, при этом скорость осаждения возрастает. Подходы к численному моделированию при этом остаются неизменными и позволяют принимать адекватные решения для предотвращения нежелательных проблем на этапе промышленной эксплуатации нефтепровода.

существует немало, и они успешно применяются в мировой практике. Цель данной работы - описание основных подходов к численному моделированию проблемы осаждения твердых примесей в нефтепроводе и создание правильной универсальной модели процесса, происходящего внутри нефтепровода, с учетом параметров процесса.

Литература

1. Leontaritis K.J. Wellbore damage by wax deposition in gas-condensate reservoirs // Energy Industry, 1999.
2. Kim K.U., Kim K.S. and Kim Y.S. Effect of Filler particle size on the rheological properties of suspension: 2. Glass bead suspended in aqueous PVA suspension // Polymer (Korea), 1:8-14, 1991.
3. Siquin A., Palermo T. and Peysson Y. Rheological and flow properties of gas hydrate suspensions // Oil and Gas Science and Technology, 59:41-57, 2004.
4. Patankar N.A. and Joseph D.D. Modeling and numerical simulation of particulate flows by the Eulerian-Lagrangian approach // International Journal of Multiphase Flow, 27:1659-1684, 2001.



Научно-технический центр

АЛГОРИТМ

Технологии будущего сегодня!

Научно-технический центр «Алгоритм» предлагает современные высокотехнологичные решения для промышленных, производственных предприятий нефтегазовой отрасли, а также для проектных институтов.

- α Гидродинамические расчеты объектов и систем
- α Расчеты линейных и нелинейных динамических процессов
- α Расчеты и анализ тепловых процессов
- α Расчеты на прочность конструкций, объектов и систем
- α Трехмерное моделирование (перевод чертежей в трехмерные модели)
- α Консалтинго-информационные услуги
- α Программное обеспечение
- α Средства автоматизации измерений, диагностики, управления и моделирования National Instruments

443042, Россия, г. Самара, ул. Белорусская 132, оф. 6
Тел. +7 (846) 972-67-60; Факс + 7(846) 309-25-04, E-mail: info@ntc-algorithm.ru