

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 1 / 2026, Vol. 18, Iss. 1 <https://esj.today/issue-1-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/61SAVN126.pdf>

2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Гу, И. Анализ методом моделирования сил внутреннего потока при транспортировке гидратов природного газа / И. Гу, А. Н. Гульков // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/61SAVN126.pdf>.

For citation:

Gu Yi., Gulkov A.N. Analysis by modeling the internal flow forces in the transportation of natural gas hydrates. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(1): 61SAVN126. Available at: <https://esj.today/PDF/61SAVN126.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 532.551

Гу Иньцзе

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия

Аспирант

E-mail: gu.in@dvfu.ru

Гульков Александр Нефедович

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия

Профессор

Доктор технических наук

E-mail: gulkov.an@dvfu.ru

Анализ методом моделирования сил внутреннего потока при транспортировке гидратов природного газа

Аннотация. В статье рассмотрена задача гидравлического подъёма частиц природных газовых гидратов по вертикальному стояку при их добыче на морских месторождениях. Автором представлен подход к анализу внутреннего поля течения в трубопроводе, позволяющий уточнить условия устойчивой транспортировки и оценить влияние различных факторов на распределение фаз и потери давления. В качестве расчётной схемы принята вертикальная труба длиной 20 м и диаметром 200 мм; моделирование выполнено в программном комплексе FLUENT на основе многофазной модели Эйлера-Эйлера и методики твердофазной флюидизации. Автором обоснован выбор исходных параметров и режимов: показано, что перенос гидратной суспензии относится к неоднородному (крупнодисперсному) потоку; в качестве базовых значений приняты плотность частиц 1200 кг/м³, объёмная доля 15 % и скорость переноса 3 м/с, после чего выполняется сравнение вариантов с изменением параметров. В статье выполнена проверка модели: расчётные значения сопротивления трения сопоставлены с экспериментальными данными, и отмечена малая погрешность, подтверждающая применимость выбранного подхода. Основные результаты включают выявление зон формирования распределения частиц: до ~2,5 м от входа частицы концентрируются в центре (максимум порядка 0,39), при этом закупорки не происходит; после ~5 м поле течения стабилизируется, а потери давления на единицу длины выравниваются. Автором также показано влияние плотности частиц, скорости, размера и объёмной доли на структуру двухфазного потока и устойчивость работы подъёмной системы.

Ключевые слова: природные газовые гидраты; FLUENT; моделирование; частицы; внутренние силы; модель Эйлера-Эйлера; вертикальный стояк

Введение

Что такое твердофазная флюидизация? Ее основная идея заключается в использовании горнодобывающего оборудования для разработки гидратных рудных тел в твердом состоянии, измельчении гидратосодержащих отложений на мелкие частицы, смешивании их с морской водой и транспортировке на морскую платформу по замкнутому трубопроводу. Этот метод преобразует неконтролируемые температурные и барометрические условия сложной морской среды в контролируемые условия, обеспечивая безопасную и экологически чистую добычу [1, с. 13647].

Ван Чжиюань и др. [2, с. 992] также исследовали характеристики многофазного потока в скважине, содержащей гидратные рудные тела, разработали модель многофазного потока в скважине, содержащей гидратные рудные тела, предложили количественный метод прогнозирования зон образования гидратов, изучили характеристики образования и отложения гидратов и получили механизм образования гидратных закупорок.

Лю Баоюй и др. [3, с. 664] исследовали характеристики потока жидкостно-твердого двухфазного потока в вертикальных трубах, оптимизировали начальные параметры для безопасного потока гидратной суспензии в трубопроводах и предоставили теоретическую основу для стабильного потока гидратной суспензии.

Ло и др. [4, с. 70] разработали трехмерную расчетную модель для течения гидратной суспензии в масляной системе на основе многофазной модели течения Эйлера. Эта модель предполагает, что вода и метан диспергированы в масляной фазе в виде капель и пузырьков соответственно, и решает задачу путем связи законов сохранения массы, импульса и энергии между различными фазами. В этом исследовании изучалось многофазное (нефть-газ-вода-гидрат) течение гидратной суспензии в масляной системе.

Лю и др. [5, с. 104] разработали двухжидкостную модель, учитывающую межчастичную адгезию, путем расширения теории кинетики частиц для изучения характеристик течения гидратной суспензии.

Лю Сяюфан и др. [6, с. 7903] экспериментально исследовали влияние различных начальных давлений и содержания воды на реологические свойства гидратной суспензии в системе нефть-вода.

Результаты исследований

1. Анализ состояния потока

На основе метода Дюрана, использующего размер частиц в качестве критерия для классификации, были определены состояния потока двухфазной жидкостно-твердой фазы (табл. 1).

Таблица 1

Классификация состояний двухфазного потока

Состояние двухфазного потока	Размер частиц
Однородная жидкость	$d < 30 \mu\text{m}$
Промежуточная жидкость	$30 \mu\text{m} < d < 50 \mu\text{m}$
Неоднородная жидкость	$50 \mu\text{m} < d$

Составлено автором на основе анализа материалов [7]

Размер частиц измельченного природного газового гидрата значительно превышает $50 \mu\text{m}$. Поэтому гидравлический перенос природного газового гидрата представляет собой неоднородный поток и может изучаться и анализироваться как поток крупных частиц.

2. Определение параметров

2.1 Плотность частиц

Ван Сюцзюань [8, с. 993] оценил среднюю насыщенность гидратов природного газа в районе Шэньху Южного моря страны в 24 % на основе формулы Арчи и с использованием метода каротажа сопротивления, при этом максимальное локальное значение достигло 44 %. Линь Линь [9, с. 208] предсказал среднюю насыщенность гидратов природного газа в 35,4 % и максимальное значение в 67,5 % с использованием модели ТРЕМ. Предсказание с использованием модели STPEB составило 29 %, а максимальное значение — 69,4 %. Таким образом, можно считать, что насыщенность гидратов природного газа находится в диапазоне от 24 % до 69,4 %. В данном имитационном исследовании в качестве базовой плотности гидратов природного газа с отложениями была принята плотность 1 200 кг/м³, и далее было проведено сравнение и анализ влияния различных плотностей на поле внутреннего потока.

2.2 Объемная доля

Объемную долю частиц в транспортируемой жидкостно-твердой двухфазной суспензии необходимо разумно выбирать в соответствии с фактической ситуацией [9, с. 208]. При трубопроводной транспортировке твердых материалов в Китае объемная доля твердых частиц обычно составляет не более 30–40 %, поэтому объемная доля частиц гидратов природного газа при гидравлическом подъеме по трубопроводу должна быть менее 30 %. В данном исследовании в качестве базовой объемной доли гидратов природного газа принято 15 %, и далее сравнивается и анализируется влияние различных объемных долей частиц на внутреннее поле потока.

2.3 Диаметр трубы

Китайский учёный Шэнь Яньхуа [10, с. 44] указал, что диаметр трубопровода не должен быть слишком большим. При малом диаметре трубы потребление энергии при разных диаметрах труб велико. Когда диаметр трубы превышает 30 см, гидравлический градиент уже не изменяется существенно с диаметром трубы. В то же время, чем больше диаметр стояка, тем быстрее увеличивается окружное и осевое напряжение стояка, что влияет на безопасность стояка. Поэтому необходимо разумно выбирать диаметр стояка [11, с. 251].

2.4 Размер частиц

При диаметре стояка 200 мм размер частиц не должен превышать 40 мм. Китайские ученые предложили, исходя из существующих конструкций горнодобывающих систем, установить размер частиц, непосредственно поднимаемых при добыче, в диапазоне от 5 до 30 мм. Поэтому в данном имитационном исследовании в качестве базового размера частиц газовых гидратов был принят 10 мм, а влияние различных размеров частиц на внутреннее поле потока было дополнительно сравнено и проанализировано.

2.5 Скорость переноса

Эксперимент Ся Цзяньсиня по псевдоожигению [12, с. 63] показывает, что при стабильном состоянии двухфазного жидкостно-твердого потока скорость переноса более 0,17 м/с может обеспечить нормальную работу системы. Для обеспечения безопасной и надежной работы гидравлической подъемной системы минимальная скорость переноса

двухфазного жидкостно-твердого потока гидратов природного газа должна быть в 3–5 раз больше скорости осаждения частиц гидратов природного газа [13, с. 72]. Поэтому 3 м/с принимается за базовую скорость переноса двухфазного жидкостно-твердого потока гидратов природного газа, и далее проводится сравнение и анализ влияния различных скоростей переноса на внутреннее поле потока.

3. Создание модели

Турбулентность возникает только тогда, когда диаметр трубы установлен на 20 см, а длина трубы в 20–45 раз превышает диаметр. В данном случае выбран множитель 100, а длина трубы установлена на 20 м. Затем создается подходящая сетка (рис. 1).

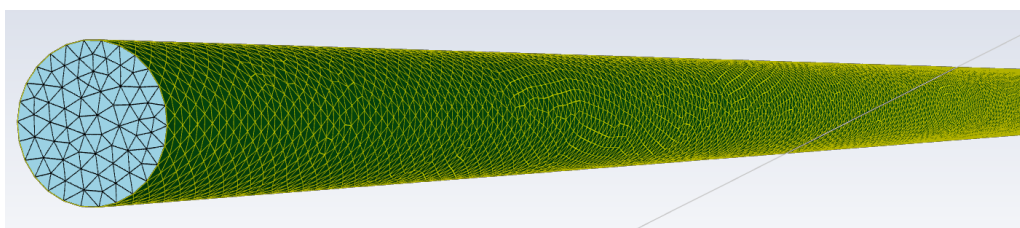


Рисунок 1. Модель трубы (разработано автором)

3.1 Проверка модели

Модель Эйлера-Эйлера была сопоставлена с экспериментальными данными и теориями, опубликованными китайскими учеными [14, с. 131], для проверки и пересмотра модели, а также определения ее применимости (табл. 2–4).

Таблица 2

Скорость потока и сопротивление трения в эксперименте с однофазной водой в статической трубке диаметром 200 мм

Скорость (m/s)	Трение (водяной столб/м)
1,865	0,0224
2,129	0,0292
2,445	0,0383
3,085	0,0622
3,958	0,1041
4,35	0,1268

Составлено автором на основе анализа материалов [14]

Таблица 3

Экспериментальный гранулометрический состав руды с объемной долей 10 %

Скорость (m/s)	Трение (водяной столб/м)
2,66	0,0558
3,549	0,0896
4,29	0,1282
3,101	0,072

Составлено автором на основе анализа материалов¹ [15]

¹ Wu Lei. 粗颗粒固液两相管流的数值模拟 [Численное моделирование трубного течения грубодисперсного твердо-жидкостного двухфазного потока]: магистерская диссертация / науч. рук. Pan Huachen. 杭州电子科技大学 [Ханчжоуский университет электронных технологий]. 2010. 150 с. — (На кит. яз.).

Таблица 4

Объемная доля руды 10 % Распределение частиц руды по размерам

Размер частиц (mm)	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5
Содержание (%)	4,2 %	18,8 %	16,6 %	31,4 %	29,3 %

Составлено автором на основе анализа материалов¹

На рисунке 2 представлено сравнение экспериментальных и модельных данных однофазной воды с учетом шероховатости.

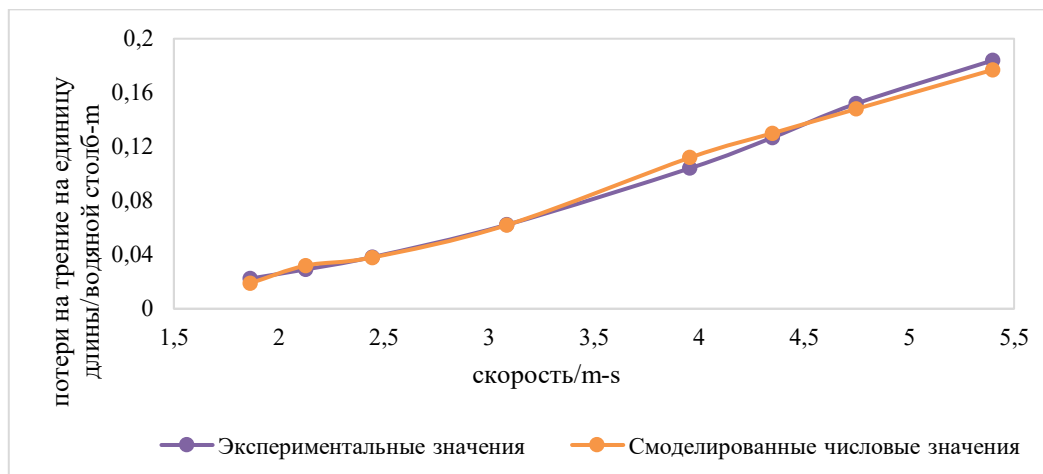


Рисунок 2. Сравнение экспериментальных и модельных данных однофазной воды с учетом шероховатости (разработано автором)

Как видно из рисунка 2, погрешность между экспериментальными и смоделированными значениями очень мала, что указывает на высокую точность модели многофазного потока Эйлера-Эйлера в FLUENT при моделировании экспериментов по двухфазному потоку жидкость-твердое тело, и, следовательно, ее применимость в основном подтверждается.¹ Данная модель может быть использована для дальнейшего изучения характеристик переноса частиц суспензии гидратов природного газа в стояке.

4. Анализ моделирования внутреннего поля потока

4.1 Анализ поля потока внутри стояка на разных высотах

На рисунке 3 показано распределение объемной доли частиц на разных высотах.

Как показано на рисунке выше, частицы начинают двигаться к центру трубы вблизи входного отверстия. На расстоянии около 2,0 м объемная доля частиц достигает своего максимума в центре трубы, составляя приблизительно 0,39. Это происходит потому, что, хотя частицы равномерно распределены на входе, на стенке трубы наблюдается некоторое распределение частиц. Из-за градиента скорости на стенке твердые частицы движутся к центру трубы, влияя на другие частицы вдоль своего пути. Впоследствии твердые частицы начинают рассеиваться. Это происходит потому, что высокая концентрация частиц в центре трубы усиливает взаимодействие частиц, заставляя их двигаться в области с более низкой концентрацией. Кроме того, центр трубы расположен в ядре турбулентности, и под влиянием турбулентных флуктуаций частицы стремятся к более равномерному распределению. На расстоянии 2,5 м от входного отверстия распределение объемной доли частиц начинает стабилизироваться, а после 5 м концентрация частиц полностью стабилизируется, что приводит к равномерному распределению частиц вблизи центра трубы.

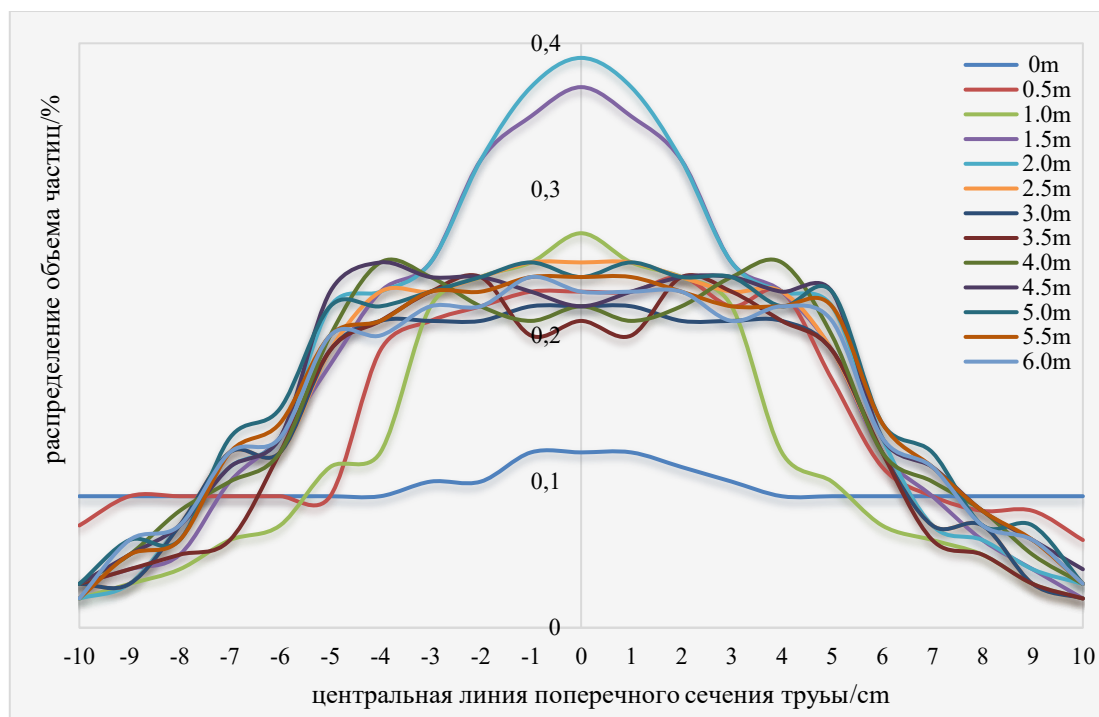


Рисунок 3. Распределение объемной доли частиц на разных высотах (разработано автором).

После стабилизации поля потока объемная доля частиц вблизи стенки трубы становится очень низкой, что снижает трение и столкновения между частицами и стенкой трубы.

4.2 Влияние плотности частиц на поле двухфазного жидкостно-твердого течения

Плотность частиц газовых гидратов природного газа изменяется в зависимости от степени их насыщенности. Для исследования влияния различной плотности частиц на поле течения был установлен размер частиц 1 см, а также использовались плотности частиц 1 000 кг/м³, 1 100 кг/м³, 1 200 кг/м³ и 1 300 кг/м³. На рисунке 4. Распределение объемной доли частиц в зависимости от плотности частиц.

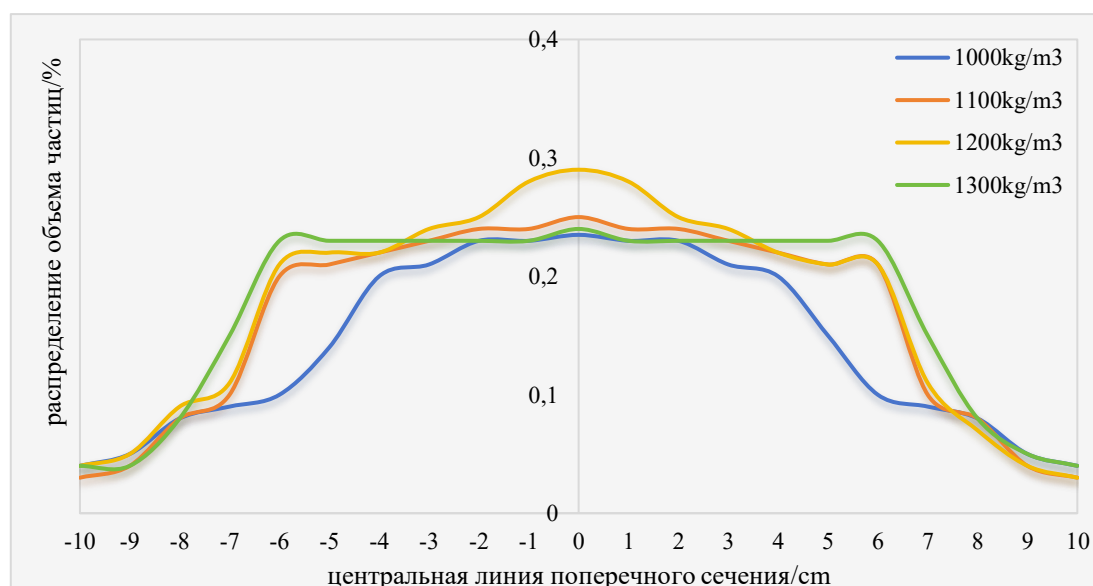


Рисунок 4. Распределение объемной доли частиц в зависимости от плотности частиц (разработано автором)

Как показано на рисунке 4 выше, концентрация частиц в центре стояка сначала увеличивается, а затем уменьшается с увеличением плотности частиц. Это происходит потому, что при более низкой плотности частиц отдельные частицы имеют меньшую массу, лучшие следящие свойства и меньшее влияние на скорость потока воды внутри стояка, что приводит к более высокой скорости внутри стояка. Одновременно с увеличением градиента скорости потока воды увеличивается подъемная сила, действующая на частицы, что приводит к большей степени агрегации частиц в центре стояка. При дальнейшем увеличении плотности частиц влияние частиц на поле потока внутри стояка возрастает, градиент скорости уменьшается, и, следовательно, распределение частиц в центре стояка становится более равномерным. Следовательно, чем выше степень насыщенности гранул гидратными частицами, тем ниже плотность частиц, тем выше скорость транспортировки и тем безопаснее работа гидравлической подъемной системы.

4.3 Влияние скорости потока на поле течения двухфазной жидкостно-твердой смеси

На рисунок 5. представлено распределение объемной доли частиц в зависимости от скорости транспортировки.

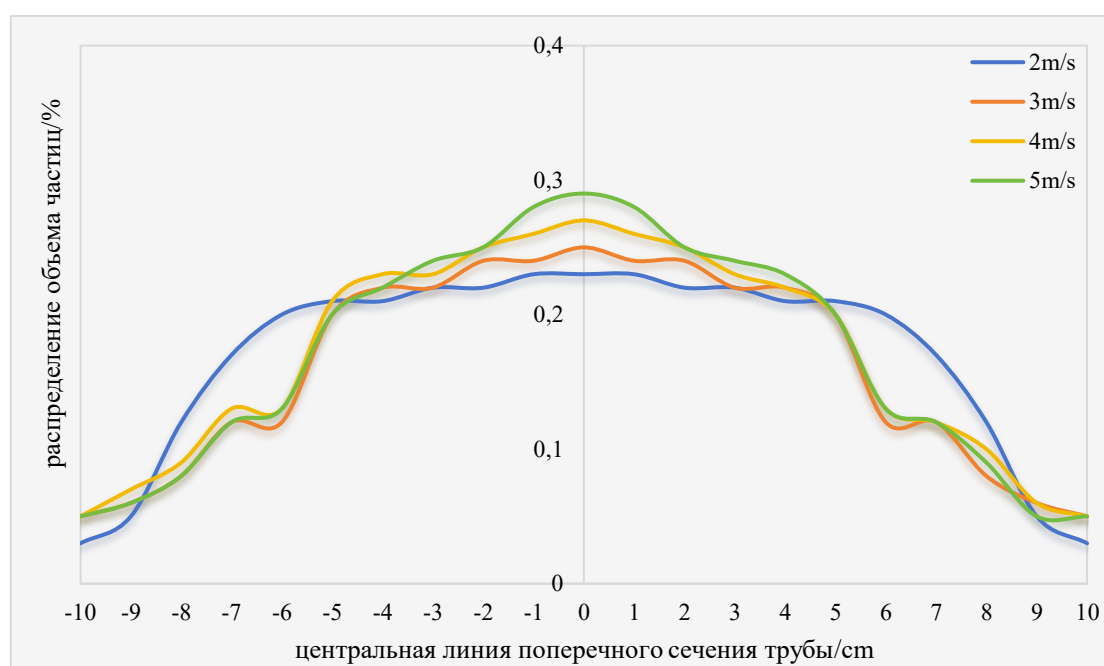


Рисунок 5. Распределение объемной доли частиц в зависимости от скорости транспортировки (разработано автором)

Как показано на рисунке, чем выше скорость на входе, тем больше агрегация частиц газовых гидратов в середине стояка; и наоборот, чем ниже скорость, тем равномернее распределение частиц и скорости [15, с. 11]. Поэтому при гидравлическом подъеме частиц газовых гидратов скорость переноса должна превышать определенное значение, чтобы обеспечить достаточный градиент скорости в пристеночной области, обеспечивая подъем частиц и уменьшая их распределение в пристеночной области.

4.4 Влияние размера частиц на поле течения двухфазного жидкостно-твердого потока

На рисунок 6. показано распределение объемной доли частиц в зависимости от размера частиц.

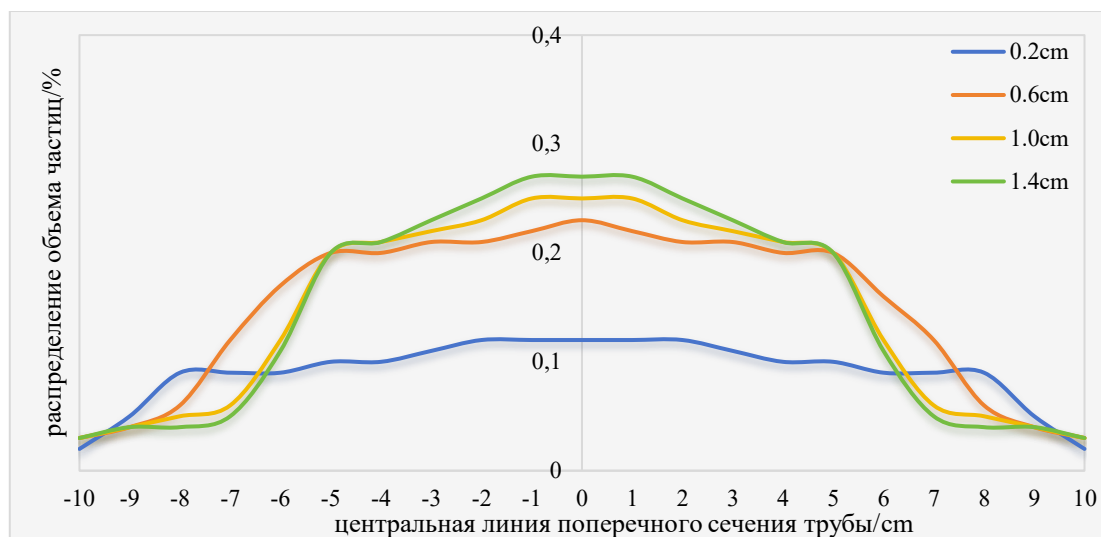


Рисунок 6. Распределение объемной доли частиц в зависимости от размера частиц (разработано автором)

Как видно из рисунка, размер частиц влияет на степень агрегации частиц в центре после стабильной транспортировки. Чем крупнее частица, тем более выраженным становится явление агрегации в восходящем потоке, тем выше концентрация частиц в центре и тем шире диапазон низкой концентрации у стенки восходящего потока. Это объясняется тем, что величина подъемной силы напрямую связана с размером частицы. Чем больше размер частицы, тем больше подъемная сила, действующая на частицу.

4.5 Влияние объемной доли частиц на поле течения двухфазного жидкостно-твердого потока

На рисунке 7. Представлен график распределения объемной доли частиц в зависимости от изменения объемной доли.

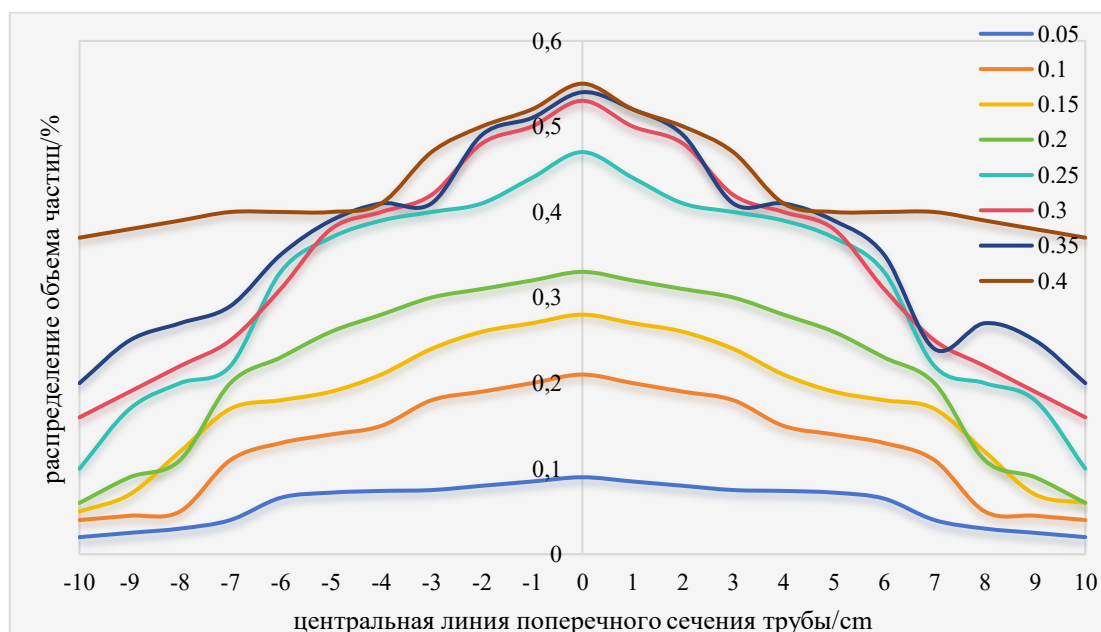


Рисунок 7. График распределения объемной доли частиц в зависимости от изменения объемной доли (разработано автором)

Как показано на рисунке выше, частицы имеют тенденцию к агрегации в центре стояка. Чем выше концентрация частиц, тем больше площадь агрегации в центре стояка. Кроме того, распределение частиц имеет тенденцию к распространению к стенке, в то время как концентрация частиц на стенке стояка остается относительно низкой. По мере увеличения объемной доли частиц, объемная доля в центре стояка также увеличивается. Однако, как только концентрация в центре стояка достигает своего максимума, приблизительно 60 %, объемная доля в центре стояка перестает увеличиваться с увеличением объемной доли на входе. Более того, когда объемная доля частиц на входе превышает 25 %, концентрация частиц на стенке также увеличивается с дальнейшим увеличением объемной доли частиц. Чтобы избежать столкновений между частицами и стояком, которые могут его повредить, концентрация частиц не должна превышать 30 %.

Заключение

В данной работе в основном изучается влияние различных параметров на распределение объемной доли частиц гидратов природного газа в вертикальном стояке и анализируется внутреннее поле потока. Анализ поля потока на разных высотах внутри стояка показывает, что на расстоянии до 2,5 м от входа частицы в основном скапливаются в центре трубы, но закупорки не происходит. После 5 м поле потока стабилизируется, и частицы равномерно распределяются вблизи центра трубы, с очень низкой концентрацией частиц в радиусе 1,5 см от стенки трубы. За исключением области у стенки, разница между скоростью воды и скоростью частиц в стояке остается стабильной; следовательно, понимание распределения скорости частиц косвенно раскрывает распределение скорости потока воды внутри трубы. Поскольку концентрация и скорость частиц еще не стабилизировались вблизи входа, потери давления на единицу длины значительны. После 2,5 м поле потока постепенно стабилизируется, и потери давления на единицу длины также стабилизируются. Было проведено моделирование и анализ влияния четырех основных параметров — плотности частиц, скорости переноса, размера частиц и объемной доли частиц — на поле двухфазного потока жидкость-твердое тело с целью дальнейшего понимания состояния переноса внутри трубы и влияния различных факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Huang, Xin. Optimization of design parameters of solid-fluidization exploitation of natural gas hydrate in South China Sea / Xin Huang, Mingjie Cai, Liangjie Mao et al. — DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.33.019. // Science Technology and Engineering. — 2020. — Т. 20, №. 33. — С. 13647–13653. (На кит. яз.).
2. Wang, Zhiyuan. 深水气井水合物流动障碍形成机制与防治方法研究进展 [Прогресс исследований механизмов формирования и методов предотвращения гидратных препятствий потоку в глубоководных газовых скважинах] / Zhiyuan Wang, Yangyang Zhang, Jianbo Zhang, Shikun Tong, Baojiang Sun // 中国科学基金 [Китайский научный фонд]. — 2021. — Т. 35, № 6. — С. 992–1005. — (На кит. яз.).
3. Liu, Baoyu. Numerical simulation of flow characteristics of natural gas hydrate in vertical pipe / Baoyu Liu, Pengpeng Hou, Liyan Shang et al. — DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2018.06.008 // Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition). — 2018. — № 39(6). — С. 664–670.

4. Lo, Simon. CFD modeling of hydrate formation in oil-dominated flows / Simon Lo // Offshore Technology Conference. — Houston, Texas: OTC, 2011. — 340 с. — URL: https://www.researchgate.net/publication/254520341_CFD_Modelling_of_Hydrate_Formation_in_Oil-dominated_Flows.
5. Liu, Jia. Numerical study on flow characteristics of hydrate slurry liquid-solid two-phase flow considering the adhesion between particles / Jia Liu, Min Ning, Ti Dong et al. — DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104410 // Journal of Natural Gas Science and Engineering. — 2022. — №. 99. — С. 104–410.
6. Lv, Xiaofang. Growth Kinetics and Slurry Viscosity Characteristics of High Pressure Natural Gas Hydrate / Xiaofang Lv, Jiawen Xu, Yingjie Liu et al. // Science Technology and Engineering. — 2022. — Т. 22, №. 18. — С. 7903–7912. (На кит. яз.).
7. Geldart, D. Types of gas fluidization / D. Geldart — DOI: 10.1016/0032-5910(73)80027-3. // Powder Technol. — 1973. — Т. 7. — С. 285–292.
8. Wang, Xiujuan. Estimation of gas hydrate saturation based on resistivity logging and analysis of estimation error / Xiujuan Wang, Shiguo Wu, Xuwei Liu, Yiqun Guo, Jing'an Lu, Shengxiong Yang, Jinqiang Liang — DOI: 10.3969/j.issn.1000-8527.2010.05.022. // Geoscience. — 2010. — Т. 24, №. 5. — С. 993–999 (На кит. яз.).
9. Jing, Pengfei. Identification of pore-filling and fracture-filling hydrate by petrophysical simulation and acoustic experiment / Pengfei Jing, Gaowei Hu, Qingtao Bu, Jie Chen, Yizhao Wan, Peixiao Mao — DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019122501 // Marine Geology & Quaternary Geology. — 2020. — № 40(6). — С. 208–218.
10. Shen, Yanhua. 混合液管道输送的能耗分析 [Анализ энергозатрат при трубопроводном транспорте смешанной суспензии] / Yanhua Shen, Jiling Mao, Sheng Ling // 中国矿业 [Китайская горная промышленность]. — 2000. — № 3. — С. 44–47. — (На кит. яз.).
11. Li, X. Stress analysis of top tensioned riser under random waves and vessel motions / X. Li, H. Guo, F. Meng — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11802-010-1719-8>. // Journal of Ocean University of China. — 2010. — №. 9. — С. 251–256.
12. Fu, Yu. 长条状粗颗粒在垂直管路中最小输送速度试验研究 [Экспериментальное исследование минимальной скорости транспортировки удлиненных крупных частиц в вертикальном трубопроводе] / Yu Fu, Hong Xiao, Jianxin Xia // 海洋工程 [Морская инженерия]. — 2019. — Т. 37, № 4. — С. 63–69. (На кит. яз.).
13. Xia, J. Hydraulic Lifting of Manganese Nodules Through a Riser / J. Xia, J. Ni — DOI: 10.1115/1.1641385 // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2004. — № 126(1). — С. 72–84.
14. Liu, Jianhua. Study on resistance loss of large particle slurry in inclined pipe (in English) / Jianhua Liu, Yifan Liu, Miaoxin Xiao — DOI: 10.3969/jissn.1001-3881.2020.24.019 // Machine Tool & Hydraulics. — 2020. — № 48(24). — С. 131–136.
15. Lü, Xiaofang. Study on rheological properties of natural gas hydrate slurry in oil-water system / Xiaofang Lü, Tianhui Liu, Jing Guo et al. — DOI: 10.1016/j.cherd.2022.10.024. // Chemical Engineering Research and Design. — № 188(277). — С. 11–34.

Gu Yinjie

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
E-mail: gu.in@dvfu.ru

Gulkov Alexandr Nefedovich

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
E-mail: gulkov.an@dvfu.ru

Analysis by modeling the internal flow forces in the transportation of natural gas hydrates

Abstract. The article addresses the problem of hydraulically lifting natural gas hydrate particles through a vertical riser during offshore production. The author presents an approach to analyzing the internal flow field in a pipeline, which makes it possible to clarify the conditions for stable transport and to assess how various factors affect phase distribution and pressure losses. As a computational setup, a vertical pipe 20 m in length and 200 mm in diameter is adopted; the simulations are carried out in FLUENT using the Euler–Euler multiphase model and a solid-phase fluidization method. The author substantiates the choice of initial parameters and operating regimes, showing that hydrate slurry transport corresponds to a heterogeneous (coarse-dispersed) flow. Baseline values are taken as a particle density of 1 200 kg/m³, a volume fraction of 15 %, and a transport velocity of 3 m/s, after which variants with modified parameters are compared. The article also validates the model: the calculated values of frictional resistance are compared with experimental data, and a small discrepancy is reported, confirming the applicability of the proposed approach. The main results include identifying the regions where particle distribution develops: within ~2.5 m from the inlet, particles concentrate in the core (with a maximum of about 0.39) without causing blockage; beyond ~5 m, the flow field stabilizes and the pressure loss per unit length becomes uniform. The author further demonstrates the influence of particle density, velocity, size, and volume fraction on the two-phase flow structure and the operational stability of the lifting system.

Keywords: natural gas hydrates; FLUENT; modeling; particles; internal forces; Euler-Euler model; vertical riser