

# Моделирование многофазных течений в аппаратах наземного обустройства нефтегазовых месторождений

Р.В. Бикбулатов, Р.Р. Исмагилов, К.Р. Юлмухаметов,  
А.А. Соловьёв, А.А. Касаткин, Л.С. Мусина

Представляются результаты CFD-моделирования работы технологических аппаратов наземного обустройства нефтегазовых месторождений (отстойники, циклонные сепараторы, устройства предварительного отбора газа). Моделирование многофазных течений, особенно нестационарных, в геометрически сложных технологических аппаратах, требующее больших вычислительных ресурсов, проводилось на кластерной системе УГАТУ в пакетах CFD-моделирования ANSYS CFX и STAR-CD/STAR-CCM+.

## 1. Введение

Аппараты наземного обустройства нефтегазовых месторождений работают, как правило, на многофазных гетерогенных смесях. Это обусловлено структурой добываемых флюидов, состоящих из нефти, воды, газа, гидратов, парафинистых и асфальтеновых отложений и т.д. Исторически методики расчета подобных аппаратов базировались на всевозможных эмпирических зависимостях, пригодных в большинстве случаев для конкретных видов нефти, ограниченных диапазонов параметров и типоразмеров самих устройств.

Усовершенствование и удешевление вычислительных систем и расчетных программ позволяет в последние годы переходить на механистические модели расчета аппаратов наземного обустройства, учитывающие природу течения. В работе рассматриваются задачи моделирования многофазных течений в аппаратах наземного обустройства, выполненные в пакетах гидродинамического моделирования на основе уравнений механики сплошной среды.

Пакеты гидродинамического моделирования ANSYS CFX и STAR-CD/STAR-CCM+ позволяют рассчитывать детальные картины течения многофазных сред в областях со сложной геометрией. Рассматриваемые аппараты, как правило, имеют сложную конструкцию при достаточно больших геометрических размерах, из-за чего приходится использовать большие расчетные сетки с мелкими ячейками. В результате расчет многофазного течения требует больших вычислительных мощностей и временных затрат, особенно при решении нестационарных задач, что делает необходимым использование параллельных вычислительных технологий.

В работе описывается опыт применения параллельных вычислительных систем для моделирования реальных технологических аппаратов и анализируется эффективность работы параллельных версий ANSYS CFX и STAR-CD/STAR-CCM+ на кластерной системе УГАТУ.

## 2. Расчет мультифазного сепаратора в пакетах гидрогазодинамического моделирования ANSYS CFX и STAR-CCM+

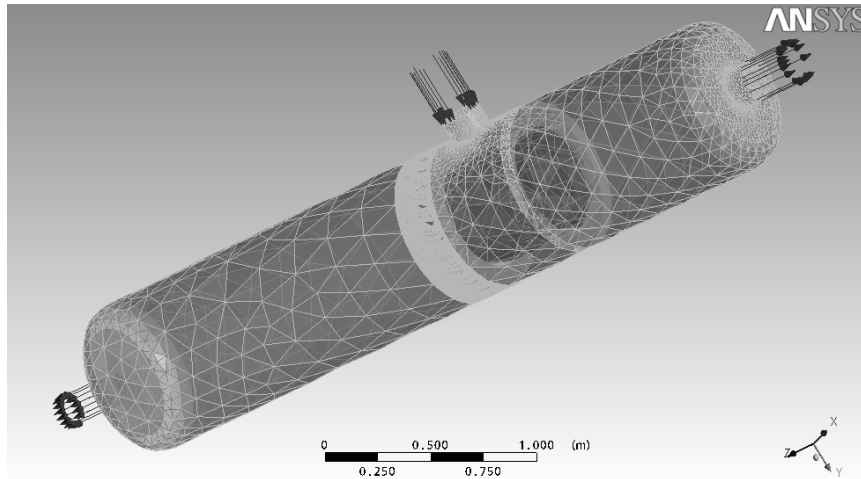
Компактный циклонный мультифазный сепаратор представляет собой компактную автономную измерительную установку. Мультифазный расходомер основан на двухфазном разделении эмульсии, после которого выполняются стандартные однофазные измерения. Основное разделение эмульсии происходит в газовой-жидкостной сепараторе. Остатки жидкости в потоке газа удаляются на стадиях очистки газа в скруббере и на стадии доочистки. Все стадии разделения эмульсии происходят внутри единого сосуда [1].

Исходные данные для расчета.

- Общий объем:  $1,5 \text{ м}^3$ .
- Объем жидкости:  $0,9 \text{ м}^3$ .
- Рекомендуемый уровень жидкости:  $1,8 \text{ м}$ .

Расчетная сетка, используемая для моделирования, представлена на рисунке 1.

- Число узлов: 475017.
- Число элементов: 418702 из них:
- Тетраэдров: 16702.
- Гексаэдров: 402000.



**Рис. 1.** Расчетная сетка, используемая для моделирования мультифазного сепаратора

Граничные условия:

- Давление на входе: 15 атм.
- Массовый расход жидкости: 0 – 10,29 кг/с.
- Массовый расход газа : 0 – 0,3 кг/с.
- Давление на выходе: 13,5 – 15 атм.

Таким образом, расчеты производились при расходе жидкости до 1000 м<sup>3</sup>/сут, и при газовом факторе в диапазоне от 0 до 1000 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

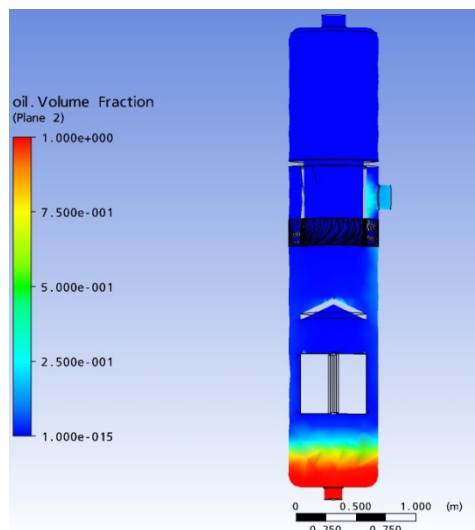
Проведенные расчеты показали, что если входные параметры лежат в области паспортных данных [2], то на выходе по газу отсутствует жидкость, а на выходе по жидкости отсутствует газ. Например, на рисунке 2 показано распределение газа и жидкости в сепараторе при расходе жидкости 1000 м<sup>3</sup>/сут и при газовом факторе 42 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. «Подушка» нефти в сепараторе препятствует выходу газа в нефтяную линию.

На рисунке 3 показан расчет распределения газа и жидкости в сепараторе, при условии, что параметры входного потока выходят за рамки паспортных данных (на выходе по газу массовый расход жидкости составляет 3,35 кг/с и газа 3,45 кг/с). При резком повышении газового фактора и неизменном состоянии нижнего клапана жидкости, уровень жидкости в сепараторе будет уменьшаться. При этом скорость изменения уровня жидкости при перепаде давлений на выходе от 0,5 до 1,5 атм, в предельном случае, когда на вход в установку подается в основном газ (например при пробковом режиме течения смеси), составляет 0,4...0,8 м/с. Это означает, что например, при условии наличия инерционности в работе клапана может возникнуть газовая воронка. Время образования газовой воронки порядка 1 – 2 сек.

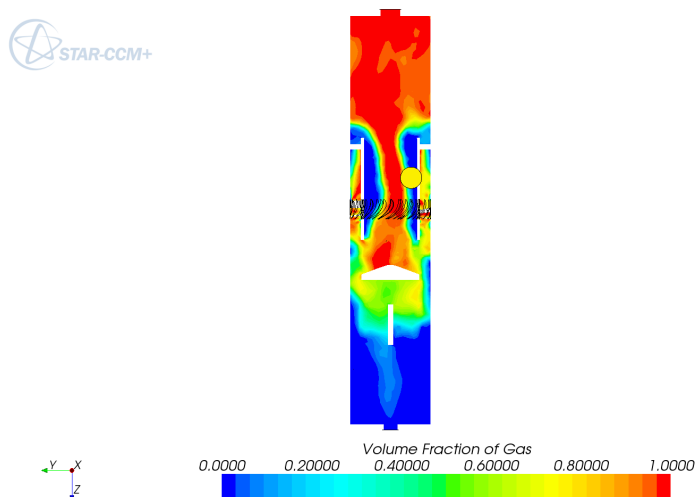
Во избежание подобных ситуаций необходимо жесткое поддержание уровня жидкости путем регулирования проходного сечения клапана, т.е. слива жидкости.

Таким образом, показано, что прорыв газа на выход жидкости может происходить и при работе установки в рамках паспортных режимов.

Одним из возможных способов устранения критических ситуаций является установка предварительного сепаратора, позволяющая как уменьшить газовый фактор, так и стабилизировать входной поток.



**Рис. 2.** Расчет работы сепаратора в рамках паспортных данных при стационарном потоке смеси на входе (красный цвет - жидкость, синий - газ)



**Рис. 3.** Расчет работы сепаратора при стационарном потоке смеси на входе, газовый фактор которого выходит за рамки паспортных данных - прорыв газа в жидкостной поток (красный цвет - газ, синий - жидкость)

### 3. Сравнительный анализ типоразмеров узла предварительного отбора газа (УПОГ)

Устройство предварительного отбора газа (УПОГ) предназначено для расслоения и усреднения потока газожидкостной смеси (ГЖС) за счет увеличения диаметра и уменьшения скорости движения потока. При этой скорости начинают происходить процессы расслоения ГЖС на нефть и воду, и «сглаживается» влияние пульсаций давления со сборных коллекторов промыслов. Выделившийся в УПОГ газ собирается вдоль верхней образующей и отбирается через газоотводящее устройство. УПОГ позволяет отобрать до 98 % свободного газа.

Основные факторы [3], влияющие на режимы течения в горизонтальных трубах:

- ✓ скорость движения,
- ✓ соотношение газовой и жидкой фаз,
- ✓ наклон трубы,
- ✓ диаметр трубы.

Для пробкового течения использовалась эмпирическая модель М. Ишии [4]:

$$C_D = 9,8(1 - \tau_B),$$

где  $C_D$  – коэффициент трения,

$\tau_B$  – объемное газосодержание.

Расчетная сетка, используемая для моделирования, представлена на рисунке 4. Общее число элементов 160 тысяч.

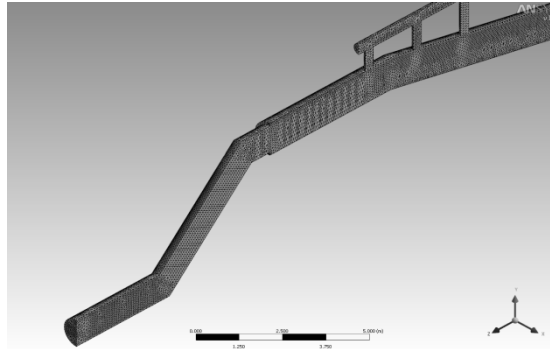


Рис. 4. Расчетная сетка, используемая для моделирования УПОГ

Результаты расчета показали, что во всех типоразмерах УПОГ газ проскакивает в линию подачи жидкости.

В случае УПОГ Ду1000 жидкость напрямую забрасывается в газовую линию, тогда как в УПОГ Ду1200 и Ду1400 жидкость проходит в газовую линию только после переполнения нисходящего колена (Рис. 5).

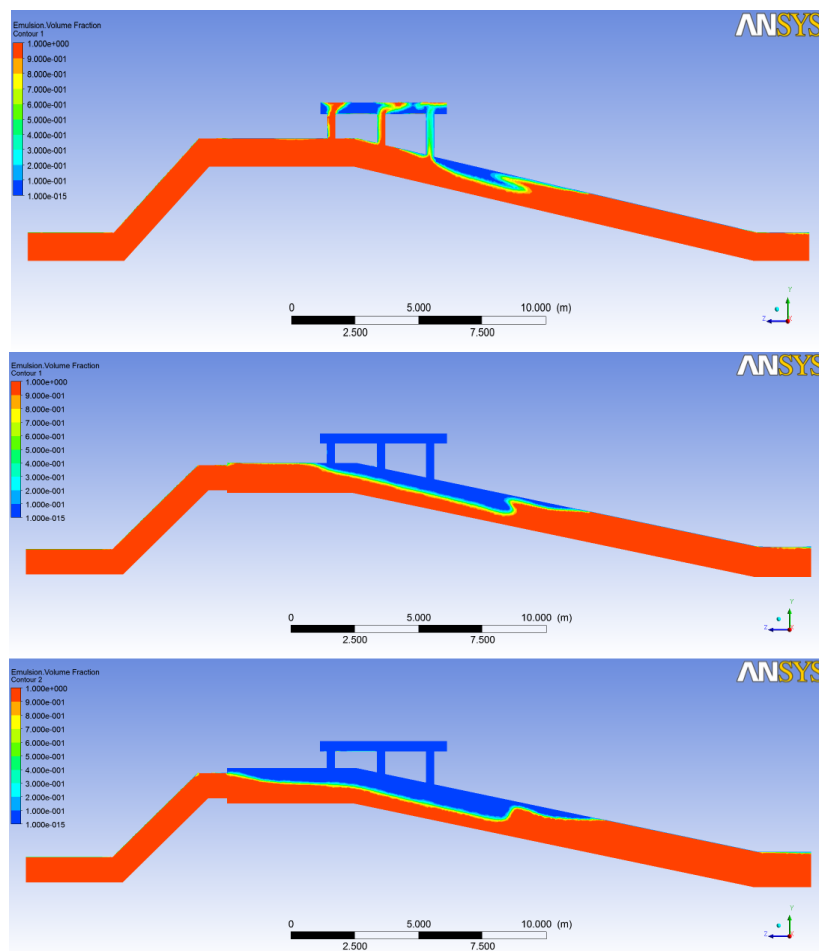


Рис. 5. Распределение объемной доли жидкости в УПОГ при Ду1000, Ду1200, Ду1400 (сверху вниз)

УПОГ Ду1200 показывает лучшую функциональность по сравнению с УПОГ Ду1000, не уступая при этом УПОГ Ду1400, который рекомендуется РД. Таким образом, УПОГ диаметром 1200мм является наиболее эффективным для уменьшения возможных пульсаций типа 2.

#### 4. Оценка производительности вычислительных пакетов

В таблице 1 приведена зависимость времени расчета тестовой задачи в пакете ANSYS CFX от количества используемых узлов и ядер кластерной системы УГАТУ. Каждый узел включает два четырехъядерных процессора Intel Xeon 5345, 8 Gb оперативной памяти, используется коммуникационная среда Infiniband. Расчетная сетка тестовой задачи содержит из 450 тыс. узлов и 1,8 млн. элементов.

Таблица 1. Время расчета при различном распределении задачи по узлам

Число узлов	Ядер на узел	Общее число ядер	Время расчета, CFX11 / CFX 12.1, мин.
1	4	4	59,78
2	2	4	59,50
3	2	6	41,97
1	8	8	45,23
2	4	8	31,97 / 23,15
4	2	8	32,23
8	1	8	32,03
3	4	12	23,43
6	2	12	23,67
7	2	14	22,78
2	8	16	26,80
4	4	16	20,35 / 14,12
8	2	16	20,68
16	1	16	20,67
10	2	20	17,87
4	6	24	18,65
6	4	24	16,20
8	3	24	16,53
12	2	24	16,57
24	1	24	16,60
7	4	28	15,32
14	2	28	15,67
8	4	32	14,97 / 9,80
16	2	32	15,35
32	1	32	15,37
6	4x6+2x4	32	16,32

Тестирование показало, что время расчета монотонно уменьшается при увеличении числа рабочих процессов, несмотря на увеличение объема коммуникаций. На данной задаче Ansys CFX 11 SP1 обеспечивает ускорение расчета примерно в 4 раза при увеличении числа процессов с 4 до 32. Очевидно преимущество последней версии Ansys CFX 12.1 – расчет осуществляется быстрее примерно в 1,5 раза.

Легко заметить, что размещение более 4 процессов на узле заметно снижает эффективность распараллеливания. Это может объясняться конкуренцией за доступ к памяти.

Рисунок 6 наглядно показывает зависимость времени счета от числа ядер.

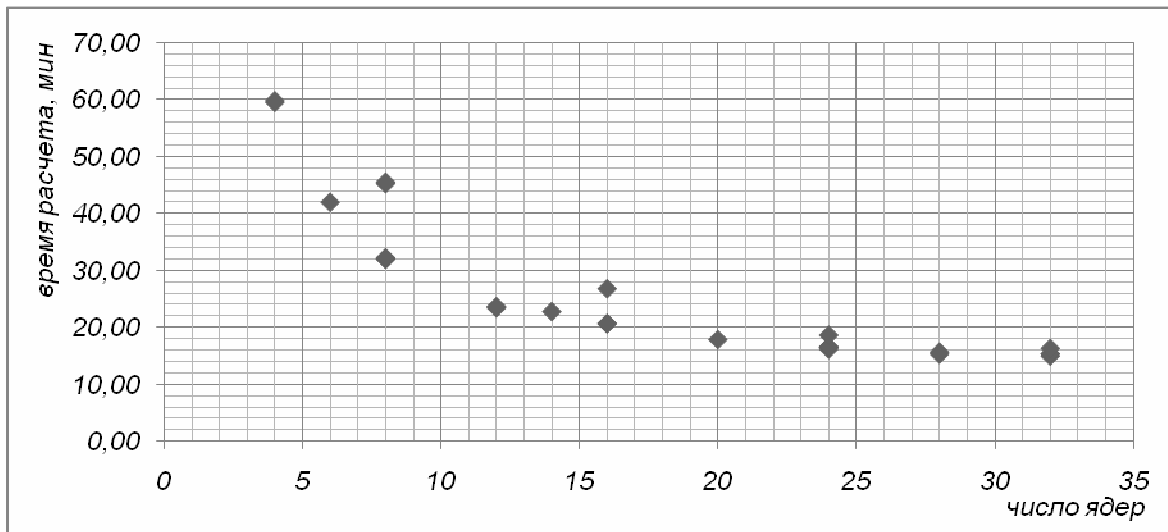


Рис. 6. Зависимость времени счета Ansys CFX 11 от числа ядер

## 5. Заключение

Результаты проведенного моделирования циклонного сепаратора в пакетах ANSYS CFX и STAR-CD/STAR-CCM+ позволили выявить допустимые рабочие диапазоны параметров сепаратора. Максимальное газосодержание потока на входе по объему составляет 35% и является максимально допустимым суммарным расходом смеси. Кроме того была оценена эффективность работы сепаратор при различном газосодержании потока на входе в сепаратор и противодавлении в выходных линиях.

Моделирование устройства предварительного отбора газа позволило определить необходимые диаметры трубопроводов в линии отбора газа, установить допустимые режимы течения двухфазной смеси, а также эффективность гашения пульсаций давления устройствами различного типоразмера. Проведенный анализ результатов моделирования показал целесообразность замены УПОГ диаметром 1400 мм на УПОГ диаметром 1200 мм.

Расчеты проводились на кластерной системе УГАТУ с использованием от 2 до 32 процессорных ядер на один расчет (ограничено лицензионным соглашением). Планируется проведение сравнительного анализа эффективности работы параллельных версий ANSYS CFX 11, ANSYS CFX 12, StarCD и StarCCM+ на реальных расчетных задачах.

## Литература

1. Бузнецов Е.Ф. Циклонные сепараторы в паровых котлах. - М., «Энергия», 1969 г.
2. Компактный циклонный мультифазный сепаратор. Паспортные данные:  
[\[http://www.phasedynamics.com/pdf/ccm\\_presentation\\_0206.pdf\]](http://www.phasedynamics.com/pdf/ccm_presentation_0206.pdf)
3. Dukler A. E., Taitel Y. Flow Pattern Transitions in Gas-Liquid Systems: Measurement and Modelling (Ed. G. F. Hewitt, J. M. Delhayе and N. Zuber) // Hemisphere Publishing Corporation. – 1986. - Vol. 2, Chapter 1.
4. Ishii M. Two-fluid model for two-phase flow // Multiphase Science and Technology, Hemisphere Publishing Corporation – 1990 - Vol. 5, P. 1-64.