ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА В ГИДРОЦИКЛОНЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТИПА

NUMERICAL MODELING OF OIL AND GAS SEPARATION PROCESSES IN A CYLINDRICAL HYDROCYCLONE

В. Е. Вершинин
Vladimir E. Vershinin

Тюменский государственный
университет,
г. Тюмень, Российская Федерация

Tyumen State University,
Tyumen, Russian Federation

Д. В. Трапезников
Dmitry V. Trapeznikov

Тюменский государственный
университет,
г. Тюмень, Российская Федерация

Tyumen State University,
Tyumen, Russian Federation

Гидроциклоны как простые, компактные и эффективные устройства сепарации центробежного типа позволяют разделять многофазные потоки жидкости и газа и находят широкое применение в устройствах самого различного назначения, в том числе и в установках для измерения расхода нефти, воды и газа. На входе в измерительную установку гидроциклон разделяет газовую и жидкую фазы, которые далее поступают в отдельные узлы измерения газа и жидкости. При этом гидроциклон должен обладать стабильно высоким качеством сепарации в максимально широком диапазоне расходов и содержания фаз. Оценка эффективности сепарации в гидроциклоне может быть проведена уже на этапе проектирования методами вычислительной гидродинамики.

В работе с помощью компьютерного моделирования исследуются процессы разделения газожидкостной смеси в гидроциклоне цилиндрического типа при различном объемном газосодержании и расходах фаз. Сопоставлены результаты моделирования методом Эйлера, где фазы представлены как неразрывные взаимопроникающие среды, и VOF-методом, где фазы разделены границей. Оценено влияние внутренних разделительных экранов в гидроциклоне на эффективность сепарации газа и нефти.

Hydrocyclones as simple, compact and efficient centrifugal separation devices allow the separation of multiphase flows of liquid and gas. They are widely used in devices for various purposes, including in installations for measuring the flow of oil, water and gas. At the entrance to the measuring unit, the hydrocyclone separates the gas and liquid phases, which then enter in the individual units for measuring gas and liquid. At the same time, the hydrocyclone must have a consistently high separation quality in the widest possible range of flow rates and phase contents. Evaluation of the separation efficiency in a hydrocyclone can be carried out already at the design stage using computational fluid dynamics methods. Using computer simulation, we study the processes of separation of a gas-liquid mixture in a cylindrical-type hydrocyclone at various gas volumes and phase flows. The simulation results are compared by the Euler method where the phases are presented as inextricable interpenetrating media and the VOF method where the phases are separated by a boundary. The influence of internal dividing screens in a hydrocyclone on the efficiency of gas and oil separation is estimated.

Ключевые слова

гидроциклон; сепарация газа;
гидродинамическое
моделирование;
численные модели;
эффективность сепарации;
OpenFoam; InterFoam;
twoPhaseEulerFoam; VOF метод

Key words

hydrocyclone; gas separation;
hydrodynamic modeling;
numerical models;
separation efficiency; OpenFoam;
InterFoam; twoPhaseEulerFoam;
VOF method;

Введение

Измерение расходов нефти, воды и газа сепарационным методом непосредственно на скважинах в режиме реального времени требует достаточно быстрого разделения фаз. Для этих целей используются сепараторы центробежного типа — гидроциклоны. Высокая точность измерения в широком диапазоне расходов и содержаний фаз достижима при стабильном качестве сепарации. При значительном изменении параметров входного потока характер движения фаз в гидроциклоне может существенно изменяться, что, в свою очередь, способно повлиять на эффективность сепарации.

В случае сепарации газожидкостного потока погрешность определения массового и объемного расхода фаз будет зависеть от остаточного содержания влаги в потоке отсепарированного газа и содержания пузырьков газа в отсепарированной жидкости. В работе [1] исследовались условия уноса газа в потоке отсепарированной жидкости. В частности, было показано, что на ряде режимов наблюдается активное вспенивание жидкости в нижней части гидроциклона, способствующее уносу газа через сливное отверстие. Гидроциклон цилиндрического типа в этом отношении выглядит более выигрышно, поскольку больший объем его нижней части приводит к снижению скоростей газа и жидкости и ослаблению условий их вторичного перемешивания. В данной работе исследуются процессы выноса газом влаги, в том числе и вторичной, при работе гидроциклона цилиндрического типа.

Теоретический анализ процесса сепарации и прогнозирование его эффективности, в первую очередь, основывается на решении уравнений гидродинамики многофазных течений [2, 3]. Для анализа работы гидроциклонов довольно часто используют упрощенные модели движения отдельной частицы в потоке жидкости или газа, либо решается гидродинамическая задача в двумерной постановке [4, 5]. Современные программные комплексы вычислительной гидродинамики [6] позволяют решать задачи такого класса в трехмерной постановке и, тем самым, на стадии проектирования измерительных установок прогнозировать эффективность сепарации. Вместе с тем на этапе выбора математической модели движения многофазного газожидкостного потока требуется учет соотношения фаз в потоке. Модель Эйлера — непрерывных взаимопро-

никающих сред [7], как правило, используют для мелкодисперсных случаев с преобладанием одной из фаз. В случаях примерного равенства долей фаз обычно применяют VOF метод [8, 9], учитывающий наличие подвижных межфазных границ (более затратный по ресурсам). В переходных случаях вопрос подбора модели решается индивидуально.

Постановка задачи

Исследование процесса выноса влаги проведено на примере сепарации газожидкостной смеси с большим газовым фактором в гидроциклоне цилиндрического типа, встроенного в сепарационную емкость. Форма и размеры гидроциклона подбирались исходя из компоновки всей измерительной установки мобильного исполнения, а также диапазонов расхода фаз. Геометрия гидроциклона представлена на рисунке 1. В боковой части гидроциклона расположен входной патрубок, по которому газожидкостная смесь подается в гидроциклон. Для отвода легкой фазы (газа) служит верхний патрубок, для вывода жидкой фазы (вода, нефть) — нижний слив. Конструктивно сливная часть гидроциклона погружена в накопительную емкость для жидкой фазы (на рисунке 1 не показана). Нижний край слива гидроциклона располагается ниже уровня жидкости в емкости, поэтому гидроциклон всегда частично заполнен жидкостью (показана на рисунке 1 темно-серым цветом). При подаче смеси в гидроциклоне создается вращающийся поток, движущийся под действием сил инерции, тяжести и перепада давления. При этом газовая фаза за счет центробежных сил выделяется из жидкости и перемещается в центральную часть гидроциклона, образуя внутренний восходящий поток, удаляющийся из аппарата через верхний газоотводный патрубок. Жидкость, как более плотная фаза, двигаясь по стенкам, стекает вниз и попадает в накопитель. Восходящие потоки газа способны отрывать капли с поверхности жидкости и уносить их с собой.

Численная модель

Численное моделирование проводилось на открытой платформе OpenFOAM с использованием двух альтернативных решателей: twoPhaseEulerFoam и InterFoam. В дальнейшем полученные решения сравнивались. Такой подход был продиктован переходным характером исследуемого режима по содержанию фаз.

1 — входной патрубок, по которому смесь подается в гидроциклон; 2 — верхний отвод для газа; 3 — цилиндрическая часть; 4 — нижний слив для жидкости
Темно-серым цветом показан уровень жидкости
Рисунок 1. Геометрия гидроциклона

В рамках двухжидкостной модели (решатель twoPhaseEulerFoam) для описания обеих фаз используются уравнения движения Эйлера. Фазы представляются в виде взаимопроникающих континуумов и описываются усредненными уравнениями движения. В процессе осреднения в систему уравнений вводится объемная доля фазы α , которая определяет вероятность того, что определенная фаза будет занимать определенную точку в пространстве в определенный момент времени. Уравнение переноса и уравнение неразрывности для объемной доли записывается в виде [2]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \alpha_\varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_\varphi \vec{U}_\varphi \vec{U}_\varphi) + \nabla \cdot (\alpha_\varphi \tau_\varphi^{eff}) &= \\ &= -\frac{\alpha_\varphi}{\rho_\varphi} \nabla p + \alpha_\varphi \vec{g} + \frac{\vec{M}_\varphi}{\rho_\varphi} \\ \frac{\partial \alpha_\varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_\varphi \vec{U}_\varphi) &= 0 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где $\varphi = г, ж$ — индексы фазы (соответственно газ или жидкость);

τ^{eff} — сумма тензора вязких напряжений и тензора Рейнольдса в приближении Буссинеска;

α_φ — объемная доля фазы («индикаторная» функция);

$\vec{M}_\varphi = \vec{F}_{drag} + \vec{F}_{lift} + \vec{F}_{vm} + \vec{F}_{turb}$ — силы межфазного взаимодействия.

Основная трудность двухжидкостной модели — задание слагаемых межфазного взаимодействия: трения, подъемной силы и силы «добавочной массы». В данной работе использовались зависимости, описанные в [10, 11].

Турбулентность описывалась моделью k-epsilon Realizable [11]. Решатель interFoam использует VOF (Volume of Fluid) метод для моделирования движения несмешиваемых жидкостей с межфазной границей. В VOF-методе решается система уравнений: уравнение движения, уравнение неразрывности и «уравнение переноса» скалярной функции насыщенности одной из фаз α_φ [8, 9] (в данном случае примем, что это газ):

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \alpha_\Gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U}_\Gamma \alpha_\Gamma) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho \vec{U}) = -\nabla p + \vec{F}_s + \nabla(\mu \nabla \cdot \vec{U}). \quad (9)$$

Введенная функция α_Γ насыщенности газовой фазы удовлетворяет условию:

$$\alpha_\Gamma = \begin{cases} 1, & \text{газовая фаза занимает весь объем расчетной ячейки} \\ 0, & \text{газовая фаза отсутствует в объеме расчетной ячейки.} \\ (0; 1), & \text{через ячейку проходит поверхность раздела фаз} \end{cases} \quad (10)$$

$\vec{U}$ — приведенная скорость смеси;

$$\vec{U} = \vec{U}_\Gamma \alpha_\Gamma + \vec{U}_ж (1 - \alpha_\Gamma).$$

Физические свойства флюида, входящие в (9), вычисляются как средневзвешенные по объему ячейки:

$$\rho = \rho_\Gamma \alpha_\Gamma + \rho_ж \alpha_ж,$$

$$\mu = \mu_\Gamma \alpha_\Gamma + \mu_ж \alpha_ж,$$

где $\alpha_ж = 1 - \alpha_\Gamma$ — объемная доля второй фазы в ячейке.

Таким образом, при формулировке математической и численной моделей приняты следующие допущения:

1. Давление в циклоне должно меняться незначительно (жидкость и газ считаются несжимаемыми);

2. Температура потока постоянна;

3. Существует граница раздела фаз. Для корректного расчета размер ячеек сетки должен быть соизмерим с размерами моделируемых капель;

4. Для обеспечения устойчивости решения на мелкой сетке необходимо измельчать временной шаг, что увеличивает время расчета;

5. Турбулентность моделируется эмпирическими константами, которые в конкретном случае могут отличаться от принятых значений. Модель турбулентности — k-epsilon Realizable.

В качестве граничных принимались следующие условия (перечисленные ниже элементы представлены на рисунке 2):

- на входе «С» — фиксированный массовый расход нефти и газа;
- на выходах «А» и «В» поддерживалось рабочее давление, равное 6 МПа.

Размеры элементов гидроциклона:

- вход «С» 130 мм × 27 мм;
- выход «А» — диаметр 160 мм;
- выход «В» — диаметр 300 мм;
- диаметр внутреннего патрубка 225 мм.

Характеристики флюидов приняты следующие: плотность нефти 900 кг/м³, расход 500 т/сут; плотность газа 1,2 кг/м³, расход 8 000 м³/сут.

На момент времени $t = 0$ принято распределение фаз, представленное на рисунке 1.

Рисунок 2. Граничные условия гидроциклона

Темно-серым цветом показана жидкость. Остальная область заполнена газом.

Далее был проведен сравнительный анализ результатов расчетов, полученных на различных решателях. На рисунке 3 приведено графическое сопоставление результатов моделирования в различные моменты времени. Данные о выносе влаги через газоотводное отверстие приведены в таблице 1.

Рисунок 3. Результаты моделирования сепарации в гидроциклоне в различные моменты времени с использованием решателей: twoPhaseEulerFoam (а) и InterFoam (б). Темно-серым цветом выделено объемное содержание жидкости. Расход нефти 500 т/сут, расход газа 8 000 м³/сут

Таблица 1. Массовый расход жидкости через верхний выход, кг/с

Время, с	Массовый расход жидкости, кг/с	
	twoPhaseEulerFoam	InterFoam
0,1	0,0	0,0
0,2	0,0	0,1
0,3	1,1	1,2
0,5	3,5	3,5
1,0	5,5	5,6
2,0	6,7	6,8

Как видно из представленных выше рисунка 3 и таблицы 1, при заданных входных скоростях в гидроциклоне происходит отрыв жидкости с поверхности и ее вынос через верхний выход по характерной траектории (рисунок 4). Поведение жидкости и скорость ее выноса для обоих решателей оказались сопоставимыми. Объемный расход выносимой жидкости в данном случае превышает ее расход на входе. Фактически гидроциклон в таком режиме работает как распылитель, обогащающий газовый поток накопленной жидкостью.

Причинами этого являются высокая скорость газа и наличие большой площади контакта газового потока с жидкостью.

Рисунок 4. Траектория движения смеси

Вполне очевидным решением, позволяющим уменьшить нежелательный вынос жидкости, является установка разделительного экрана между газом и жидкостью. Для оценки эффективности такого решения была создана новая численная модель гидроциклона, в которой ниже внутреннего патрубка был помещен разделительный диск такого же диаметра 225 мм, с отступом от патрубка на 130 мм (рисунок 5). Начальные условия те же, что и в предыдущих расчетах. Расчеты для гидроциклона оптимизированной конструкции проводились только на решателе twoPhaseEulerFoam, поскольку решатель InterFoam давал идентичные результаты при большем времени расчета и более высокой чувствительности к качеству расчетной сетки.

На рисунке 6 и в таблице 2 представлены результаты моделирования выноса жидкости с газом в гидроциклоне с диском-отсекателем.

Как видно из таблицы 2, вынос жидкости через верхний патрубок при установке диска сократился практически в три раза.

Рисунок 5. Общий вид гидроциклона с диском

Рисунок 6. Результаты моделирования сепарации в гидроциклоне с разделительным диском в различные моменты времени с использованием решателя twoPhaseEulerFoam. Темно-серым цветом выделено объемное содержание жидкости. Расход нефти 500 т/сут, расход газа 8 000 м³/сут

Таблица 2. Сравнение массового расхода жидкости через верхний выход, кг/с

Время, с	Массовый расход жидкости, кг/с	
	гидроциклон без диска	гидроциклон с диском
0,1	0,0	0,0
0,2	0,0	0,0
0,3	1,1	0,4
0,5	3,5	1,2
1,0	5,5	1,8
2,0	6,7	2,2

Таким образом, моделирование показало, что установка диска ограничивает вынос жидкости через верхний выход гидроциклона, хотя и не сводит его к нулю.

Вывод

Численное моделирование двухфазного потока «нефть — газ» в гидроциклоне цилиндрического типа показало, что на скоростных режимах с небольшим входным влажосодержанием может наблюдаться вторичный унос жидкости. Результаты моделирования на раз-

личных решателях twoPhaseEulerFoam и InterFoam дают практически совпадающие результаты. На рассмотренных режимах сепаратор фактически повышает влажность выходящего потока газа. Это может негативно сказаться на точности определения массового расхода фаз измерительной установкой с гидроциклоном в своем составе. Данное явление вторичного уноса жидкости может быть существенно ослаблено за счет изменений в конструкции гидроциклона, а именно установкой разделительных экранов в виде дисков, размещенных над уровнем жидкости.

Работа выполнена при поддержке Департамента инвестиционной политики и государственной поддержки предпринимательства Тюменской области в рамках реализации проекта по постановлению Правительства Тюменской области № 105-п от 07.05.2007 г., по договору № 004-ИД от 15.10.2018 г. АО «ГМС Нефтемаш» совместно с ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет».

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Варавва А.И., Вершинин В.Е., Трапезников Д.В. Численное моделирование процесса дегазации газожидкостной смеси в гидроциклоне // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Т. 5. № 3. С. 213–229.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.

3. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред: В 2 ч. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.
4. Баранов Д.А., Кутепов А.М., Лагуткин М.Г. Расчет сепарационных процессов в гидроциклонах // Теоретические основы химической технологии. 1996. Т. 30. № 2. С. 117–122.
5. Матвиенко О.В., Агафонцева М.В. Численное исследование процесса дегазации в гидроциклонах // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2012. № 4 (20). С. 107–118.

6. Official Website of OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox. URL: <http://www.openfoam.com> (дата обращения: 15.06.2020).

7. Manni A. An Introduction to TwoPhaseEulerFoam with Addition of a Heat Exchange Model // Project Work for the Course in CFD with Opensource Software, Chalmers University of Technology. 11.12.2014. URL: http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2014/Alessandro%20Manni/ReportAM.pdf (дата обращения: 15.06.2020).

8. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // *Journal of Computational Physics*. 1981. Vol. 39. No. 1. P. 201–225.

9. Копысов С.П., Тонков Л.Е., Чернова А.А. Применение методов VOF и SPH для решения задач с развитой свободной поверхностью // *Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета*. 2015. № 2 (46). С. 76–84.

10. Иевлев В.М. Численное моделирование турбулентных течений. М.: Наука, 1990. 214 с.

11. Юн А.А. Теория и практика моделирования турбулентных течений. М.: Либроком, 2009. 272 с.

REFERENCES

1. Varavva A.I., Vershinin V.E., Trapeznikov D.V. Chislennoe modelirovanie protsessa degazatsii gazozhidkostnoi smesi v gidrotsiklone [Numerical Modeling of the Degassing Process of a Gas-Liquid Mixture in Hydrocyclone]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika — Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2019, Vol. 5, No. 3, pp. 213–229. [in Russian].

2. Loitsyanskii L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of Liquid and Gas]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 736 p. [in Russian].

3. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred: V 2 Ch.* [Dynamics of Multiphase Media: In 2 Parts]. Moscow, Nauka Publ., 1987, P. 1. 464 p. [in Russian].

4. Baranov D.A., Kutepov A.M., Lagutkin M.G. Raschet separatsionnykh protsessov v gidrotsiklonakh [Calculation of Separation Processes in Hydrocyclones]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii — Theoretical Foundation of Chemical Engineering*, 1996, Vol. 30, No. 2, pp. 117–122. [in Russian].

5. Matvienko O.V., Agafontseva M.V. Chislennoe issledovanie protsessa degazatsii v gidrotsiklonakh [Numerical Simulation of the Degassing Process in Hydrocyclones]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika — Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2012, No. 4 (20), pp. 107–118. [in Russian].

6. Official Website of OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox. Available at: <http://www.openfoam.com> (accessed 15.06.2020).

7. Manni A. An Introduction to TwoPhaseEulerFoam with Addition of a Heat Exchange Model. Project Work for the Course in CFD with Opensource Software, Chalmers University of Technology. 11.12.2014. URL: http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2014/Alessandro%20Manni/ReportAM.pdf (accessed 15.06.2020).

8. Hirt C.W., Nishols B.D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics*, 1981, Vol. 39, No. 1, pp. 201–225.

9. Kopysov S.P., Tonkov L.E., Chernova A.A. Primenenie metodov VOF i SPH dlya resheniya zadach s razvitoi svobodnoi poverkhnost'yu [Application of VOF and SPH to Solve Problems with a Developed Free Surface]. *Izvestiya Instituta matematiki i informatiki Udmurtskogo gosudarstvennogo universiteta — Proceedings of the Institute of Mathematics and Informatics at Udmurt State University*, 2015, No. 2 (46), pp. 76–84. [in Russian].

10. Ievlev V.M. *Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techenii* [Numerical Modeling of Turbulent Flows]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 214 p. [in Russian].

11. Yun A.A. *Teoriya i praktika modelirovaniya turbulentnykh techenii* [Theory and Practice of Turbulent Flow Modeling]. Moscow, Librokom Publ., 2009. 272 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Вершинин Владимир Евгеньевич, доцент кафедры моделирования физических процессов и систем, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Российская Федерация

Vladimir E. Vershinin, Assistant Professor of Physical Processes and Systems Modeling Department, Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation

e-mail: v.e.vershinin@utmn.ru

Трапезников Дмитрий Владимирович, инженер по математическому моделированию отдела автоматизации и цифрового моделирования, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Российская Федерация

Dmitry V. Trapeznikov, Engineer for Mathematical Modeling of Automation and Digital Modeling Department, Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation

e-mail: d.v.trapeznikov@utmn.ru