

УДК 622.276.43

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ СЕПАРАТОРЕ

Тимербаев А.С., Таранова Л.В.

ГОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет»,
Тюмень, e-mail: general@tsgu.ru

В настоящее время в условиях роста обводненности продукции скважин значительное внимание уделяется проблеме очистки нефтесодержащих подтоварных вод, используемых для заводнения пластов. Для повышения эффективности очистки нефтесодержащей воды в работе предлагается центробежный сепаратор с крыльчаткой. Для изучения гидродинамики и оптимизации процесса разделения разработана компьютерная модель сепаратора и исследовано влияние параметров процесса на эффективность его проведения методами численного моделирования с использованием программных продуктов. Выполнены расчеты для двухфазного потока с учетом его вращения под действием центробежных сил. Оптимизированы основные параметры для эффективного разделения смеси: минимальный расход жидкости, длина зоны сепарации, частота вращения крыльчатки. По результатам исследований разработаны рекомендации для оптимизации конструкции аппарата и процесса разделения водонефтяных смесей, согласно которым необходимо устранить «слепую» часть ротора в районе вала, сократить длину зоны сепарации, увеличить расход жидкости на входе, либо уменьшить частоту оборотов крыльчатки.

Ключевые слова: турбогидроциклон, динамический гидроциклон, разделение водонефтяной эмульсии, численное моделирование

NUMERICAL SIMULATION SEPARATION OIL-WATER EMULSIONS IN CENTRIFUGAL SEPARATOR

Timerbaev A.S., Taranova L.V.

Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, e-mail: general@tsgu.ru

Regarding current increase of well production water cut level, the great attention paid nowadays to the problem of treating oil-containing produced water used for injection into wells. To improve efficiency of oil-containing produced water treatment, a centrifugal separator with vane impellers is introduced. To study hydrodynamics and optimization of the separation process a computer model of separator was used; and influence of the process parameters on efficiency of the process implementation was studied by means of numerical modeling using software products. The two-phase flow was calculated regarding its swirling under the centrifugal forces. Optimization of the basic parameters for effective flow separation was done which are the minimum flow rate, length of separation zone, and speed of vane impellers. Upon investigation results, the recommendations for optimization of the aggregate construction and water-oil separation process have been introduced. Following these recommendations one should eliminate the “blind” part of the rotor near the shaft, shorten length of the separation zone, increase the flow rate at the inlet or decrease speed of the vane impellers.

Keywords: turbohydrocyclone, dynamic hydrocyclone, separation oil-water emulsion, numerical simulation

При разработке нефтяных месторождений, как известно, в целях поддержания пластового давления (ППД), интенсификации нефтедобычи и увеличения коэффициента нефтеотдачи используют заводнение продуктивных пластов. Это приводит к росту обводненности продукции скважин – доля воды на завершающей стадии разработки месторождений составляет более 90%, а в среднем по отрасли – превышает 80%, при этом общий объем извлекаемой из недр пластовой воды превышает миллиард кубических метров в год [1]. В этих условиях все более актуальной становится проблема очистки нефтесодержащих подтоварных вод, используемых для заводнения пластов, с целью удаления эмульгированной нефти, механических примесей и сохранения приемистости скважин. Основные требования к качеству нагнетаемых в продуктивные пласты вод определяет отраслевой стандарт ОСТ 39-225-88 «Вода для заводнения нефтяных пластов. Требования к качеству»,

в котором регламентируется допустимое содержание в воде нефти и механических примесей, в зависимости от проницаемости пористой среды коллектора. Для плохо проницаемых коллекторов эти показатели не должны превышать значений 3-5 мг/л. Удовлетворение таких жестких требований к качеству вод возможно путем совершенствования технологий и оборудования, используемого в процессах водоподготовки.

Наиболее дешевым способом водоподготовки является разделение неоднородных систем под действием гравитационных сил в резервуарах-отстойниках, но обеспечить качество вод в соответствии с наиболее жесткими требованиями стандарта при этом затруднительно. Для повышения эффективности разделения загрязненных вод перспективно использование центробежных сил. Реализация этого способа возможна, например, в таких хорошо известных аппаратах как гидроциклоны [3,4-7]. Для решения рассматриваемых задач пер-

спективны динамические гидроциклоны, к преимуществам которых относятся более высокая производительность и широкий диапазон технологических режимов [4]. При разработке аппаратов для решения задач водоподготовки при разработке нефтяных месторождений и нахождения их рабочих характеристик следует изучить и математически описать происходящие в них процессы, что и определило направление настоящих исследований.

Целью работы явилась разработка компьютерной модели центробежного сепаратора и изучение гидродинамики процесса разделения нефтесодержащих вод для определения оптимальных параметров разделения. В рамках проводимых авторами исследований разрабатывается конструкция проточного центробежного сепаратора для разделения водонефтяных смесей, центробежная сила в котором создается за счет закручивания входящего потока при помощи импеллера (крыльчатки) [2]. В задачи исследования входило определение основных параметров работы аппарата, обеспечивающего качественное разделение водонефтяной

смеси: минимальный расход входящего потока, длина зон рециркуляции и разделения (сепарации), частота вращения крыльчатки.

Материалы и методы исследования

В качестве методов исследования при моделировании конструкции центробежного сепаратора применяли методы компьютерного 3D-моделирования в программе Autodesk Inventor; при изучении гидродинамики потока с учетом его вращения – программу OpenFOAM, программный комплекс SALOME, а также MRF-подход, метод подвижных систем отсчета, RANS-метод.

Результаты исследования и их обсуждение

Разрабатываемый центробежный сепаратор, 3D-модель которого приведена на рис 1, представляет проточный сепаратор трубчатого типа, центробежная сила в котором создается за счет вращения импеллера (крыльчатки), установленного на входе потока. Для изучения процесса разделения нефтесодержащих вод были созданы геометрическая и сеточная модели сепаратора и рассмотрены математические модели.

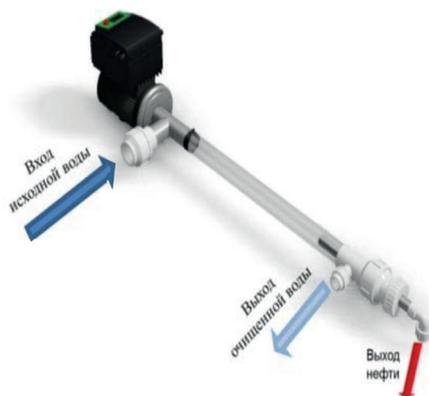


Рис.1 3D-модель центробежного сепаратора

Для построения геометрической и сеточной моделей был использован программный комплекс SALOME. Геометрическая модель внутреннего пространства строилась на основе разработанной 3D-модели. В качестве расчетной области рассматривалось внутреннее пространство сепаратора. При подготовке геометрии, сетки и проведения дальнейших расчетов внутренняя область модели была разбита на две зоны – вращающуюся и стационарную. Сеточная модель состоит из элементов гексаэдрической формы, которая более экономична по сравнению с тетраэдрической сеткой с точки зрения затрачиваемого на расчет времени, к тому же обладает меньшей численной диффузией, когда ориентирована по линиям тока. Однако гексаэдрическая сетка более

трудоемка в построении – количество ячеек в сетке составило около 350 тыс.

Модель была просчитана на стационарном решателе для несжимаемого турбулентного потока, использующем SIMPLE-алгоритм для совместного решения уравнений скорости и давления (SimpleFOAM). Вращение учитывалось введением неинерциальной системы отсчета, связанной с крыльчаткой. В такой системе отсчета ротор оказывается неподвижен, но уравнения движения требуют введения дополнительных слагаемых, учитывающих центробежную и кориолисову силу (MRF-подход, метод подвижных систем отсчета). В таблице показано, как изменяется при этом система уравнений Навье-Стокса. Выбор данного подхода обусловлен тем, что по

сравнению с динамической сеткой не требуется пересчет на каждом временном шаге положения сетки и дополнительного определения перетоков между несогласованны-

ми ячейками, которые возникают на границе вращающейся и неподвижной частей сетки, и поэтому проводится с меньшими временными затратами.

Уравнения Навье-Стокса при MRF-подходе

Система отсчета	Скорость	Система уравнений Навье-Стокса
Неподвижная (инерциальная)	Абсолютная	$\begin{cases} \nabla \cdot (\vec{u}_I \cdot \vec{u}_I) = -\nabla \left(\frac{p}{\rho} \right) + \nabla(\tau^{eff}) \\ \nabla \cdot \vec{u}_I = 0 \end{cases}$
Вращающаяся	Относительная	$\begin{cases} \nabla \cdot (\vec{u}_R \cdot \vec{u}_R) + 2\Omega \times u_R + \Omega \times \Omega \times \vec{r} = -\nabla \left(\frac{p}{\rho} \right) + \nabla(\tau^{eff}) \\ \nabla \cdot \vec{u}_R = 0 \end{cases}$
Вращающаяся	Абсолютная	$\begin{cases} \nabla \cdot (\vec{u}_R \cdot \vec{u}_I) + 2\Omega \times \vec{u}_I = -\nabla \left(\frac{p}{\rho} \right) + \nabla(\tau^{eff}) \\ \nabla \cdot \vec{u}_I = 0 \end{cases}$

Для описания движения потока, учитывая его неоднородность, проведен также расчет на многофазном решателе twoPhaseEulerFoam, использующем континуальный подход, в котором обе фазы представляют-

ся как движущиеся друг в друге сплошные среды, взаимодействующие между собой (двухжидкостный подход). При таком подходе уравнения неразрывности и движения записываются для каждой фазы отдельно:

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

где

φ – указывает фазу;

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

α_φ – объемная доля фазы φ («индикаторная» функция);

\vec{M}_φ – силы межфазного взаимодействия

Система (1) дополняется замыкающими соотношениями, определяющими межфазные силы: силу трения, силу присоединенной массы, подъемную силу и силу дополнительную сопротивления, возникающую при турбулентном обтекании частиц среды.

Вращение ротора для многофазных расчетов также моделировалось методом подвижных систем отсчета. Учет турбулентности во всех расчетах проводился RANS-методом (методом напряжений Рейнольдса), использовалась $k\omega$ -SST модель.

Для оптимизации параметров процесса разделения были выполнены две серии расчетов. Первая серия расчетов была направлена на исследования особенностей течения смеси в сепараторе и проведена

с варьированием расхода жидкости на входе (Q) от 3 до 20 м³/ч при частоте вращения крыльчатки 3000 об/мин (рис. 2).

Анализ результатов этой серии расчетов показал, что предлагаемая комбинация расхода жидкости на входе и скорости вращения вала крыльчатки для данной конструкции не согласованы, т.к. возникает зона сильной рециркуляции – вода засасывается обратно в крыльчатку. Это явление вызвано тем, что скорость входного потока по сравнению со скоростью вращения крыльчатки слишком мала. При этом установлено минимальное значение расхода воды на входе (15 м³/ч), при котором исчезает рециркуляция, и дальнейшее моделирование процесса сепарации частиц нефти было произведено на данном режиме.

По результатам второй серии расчетов (моделирование процесса сепарации) были построены картины поля объемной концентрации частиц нефти в центральном и различных поперечных сечениях трубы (рис. 3), а также графики нефтесодержания потока внутри и вне центрального круга в зависимости от его радиуса (рис. 4).

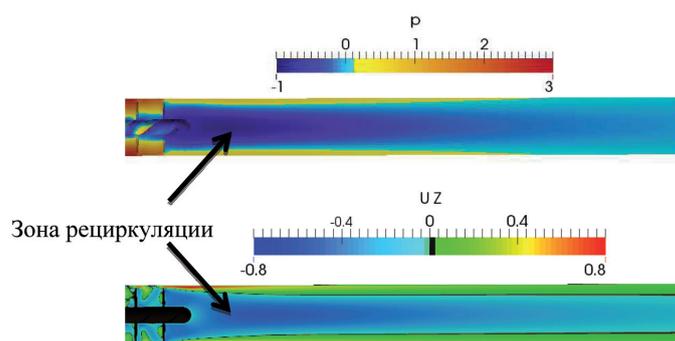


Рис 2. Распределение давлений (а) и z-компоненты (продольного движения) скорости (б) на центрально-осевом срезе трубы сепаратора

Анализируя картины поля объемной концентрации частиц нефти (рис. 3) видно, что за счет наличия зоны рециркуляции жгут нефти образуется только на расстоянии 0,4 метра от крыльчатки. Структура неф-

тяной струи оказывается нестабильной за счет того, что угловая компонента скорости и завихренность потока по мере удаления от крыльчатки уменьшаются. Как следствие частицы нефти вновь «размываются» по трубе.

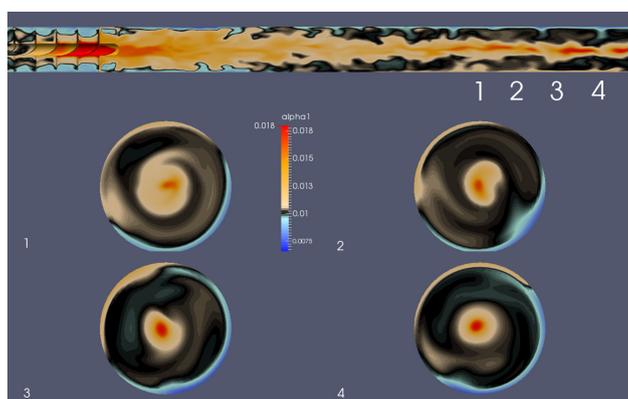


Рис 3. Объемная концентрация частиц нефти α_{11} в продольном и поперечном сечении на удалении 0,48 м (1 срез), 0,54 м (2 срез), 0,6 м (3 срез), 0,66 м (4 срез) от крыльчатки

Для получения информации о качестве сепарации смеси в зависимости от возможного радиуса приемной трубы для отбора неф-

ти, были построены графики нефтесодержания потока внутри и вне центрального круга в зависимости от радиуса этого круга (рис. 4).

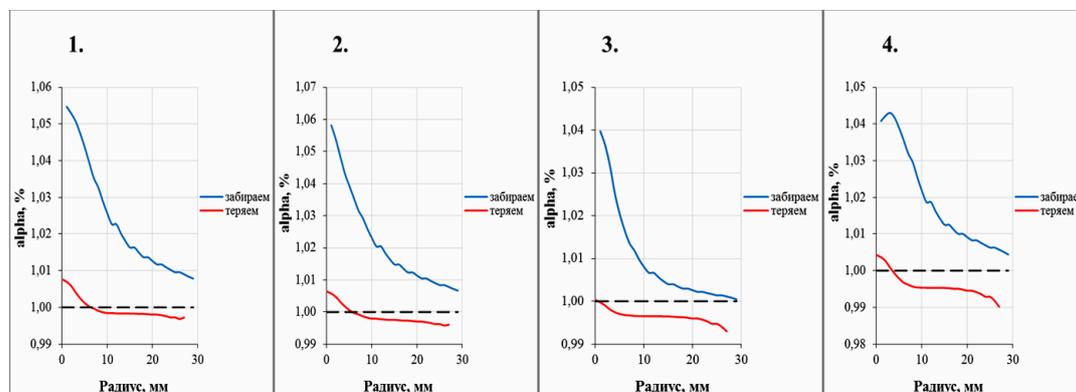


Рис 4. Количество нефти в забираемой и оставшейся в сепараторе водонефтяной смеси при различных удалениях трубы-отборника от конца крыльчатки: 0,48 м (1 срез), 0,54 м (2 срез), 0,6 м (3 срез), 0,66 м (4 срез)

Исходя из приведенных данных, можно заключить, что качество разделения водонефтяной смеси оказывается низким и содержание нефти в оставшейся воде практически не снижается по отношению к среднему значению на входе. Это может быть связано с конструктивными недостатками аппарата, т.к. в аппарате существуют три «застойные» зоны с высокой концентрацией нефти (рис. 5).

Первая зона находится на выходе из впускного патрубка. Она связана с вихрями, образующимися при вращении крыльчатки ротора. Вторая подобласть локализована в «слепой» части ротора в районе вала. В этом месте находится застойная зона. И, наконец, третья подобласть – «жгут» нефти на выходе из ротора.

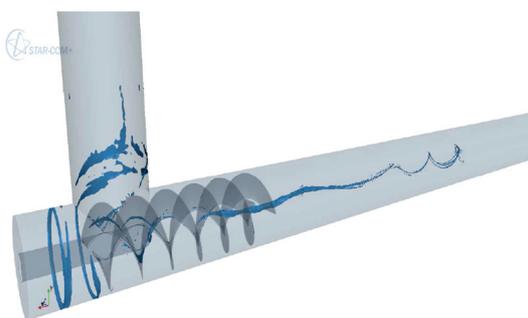


Рис. 5. Изоповерхность зоны высокой концентрации нефти

Результаты второй серии расчетов позволили выработать следующие рекомендации для оптимизации конструкции сепаратора:

1. Для обеспечения формирования устойчивой «вихревой нитки» нефти и уменьшения рециркуляции потока необходимо увеличить расход жидкости на входе (не менее 15 м³/ч), либо уменьшить обороты крыльчатки (до 1000 об/мин).

2. Для повышения качества разделения и гидродинамических условий проведения процесса необходимо оптимизировать геометрию аппарата путем устранения «слепой» части ротора в районе вала и сокращения длины зоны сепарации (до 0,4 метра).

Выводы

Таким образом, в настоящей работе разработана модель центробежного сепаратора с крыльчаткой и проведены расчеты, показавшие возможность применения данного аппарата для разделения жидких неоднородных систем типа «вода-нефть». На основании проведенных расчетов определены основные параметры процесса разделения и выработаны рекомендации для оптимизации

конструкции сепаратора с целью повышения эффективности его работы.

Список литературы

1. Мансуров Р.И., Бриль Д.М., Емков А.А. Основные направления в развитии техники и технологии подготовки нефти и очистки воды на промыслах // Нефтяное хозяйство.-1990. – № 9. – С. 54–62.
2. Тимербаев А.С. Разработка конструкции центробежного сепаратора с крыльчаткой и исследование течения жидкости при различных режимах//Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2013 – Т. №1. – С. 285–286
3. Халатов А.А., Жизняков В.В., Найденко В.В. Гидродинамика закрученного потока в выходном канале гидроциклона. Горький, 1981. С.206–208
4. Jones P.S. A Field Comparison of Static and Dynamic Hydrocyclone// SPE Production and Facilities. – 1993. – PP. 84-90.
5. Panfeng Z.D. Songsheng and Z. Fulun, Numerical analysis on the characteristics of fluid motion within dynamic hydroclone// Proceeding of the World Congress on Engineering and Technology. – 2011. – PP. 295–298.
6. Guangdong Guo, Songsheng Deng Research on Dispersed Oil Droplets Breakage and Emulsification in the Dynamic Oil and Water Hydrocyclone// Advance Journal of Food Science and Technology. – 2013. – 5(08). – PP. 1110–1116.
7. Qicheng, L. and Z. Wenjie Study on characteristics of flow field of dynamic hydrocyclone for oily wastewater separating machine// Design Res. – 2011.– PP. 99–101.

References

1. Mansurov R.I., Bril D.M., A.A. Emkov, The main trends in the development of engineering and technology for oil and water treatment in the fields // Oil Industry. – 1990. – no. 9. – PP. 54–62 .
2. Timerbaev A.S. Engineering construction of a centrifugal separator with an impeller and studying fluid flow at different operation modes// Modern Technique and Technologies: XIX International Conference for Students and Young Scientists. – 2013 – T. no. 1. – PP. 285–286
3. Halatov A.A., Zhiznyakov V.V., Naydenko V.V. Hydrodynamics of swirling flow in the outlet of the hydrocyclone. Gorky, 1981. PP. 206–208
4. Jones P.S. A Field Comparison of Static and Dynamic Hydrocyclone// SPE Production and Facilities. – 1993-PP. 84–90.
5. Panfeng Z.D. Songsheng and Z. Fulun, Numerical analysis on the characteristics of fluid motion within dynamic hydroclone// Proceeding of the World Congress on Engineering and Technology.-2011-PP. 295–298.
6. Guangdong Guo, Songsheng Deng Research on Dispersed Oil Droplets Breakage and Emulsification in the Dynamic Oil and Water Hydrocyclone// Advance Journal of Food Science and Technology.-2013- 5(08)-PP. 1110–1116.
7. Qicheng, L. and Z. Wenjie Study on characteristics of flow field of dynamic hydrocyclone for oily wastewater separating machine// Design Res.-2011-PP. 99–101

Рецензенты:

Леонтьев С.А., д.т.н., профессор кафедры «Разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень;

Гунцов А.В., д.х.н., профессор, заведующий кафедрой общей и физической химии, Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень.

Работа поступила в редакцию 24.06.2014.