

ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ВОДОНЕФТЯНОЙ СМЕСИ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ СЕПАРАТОРЕ

¹Тимербаев А.С., ¹Таранова Л.В.

¹ГОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: general@tsoгу.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. Исследования направлены на верификацию численной модели процесса разделения водонефтяной смеси в центробежном сепараторе путем проведения реального эксперимента. Расчеты проводились с использованием программы OpenFOAM. Из известных моделей турбулентности были выбраны наиболее подходящие для исследуемой задачи. По результатам экспериментов получена визуализация вихревых структур в зоне разделения и определена эффективность разделения водонефтяной смеси в центробежном сепараторе. Получены зависимости формирования устойчивого «жгута» нефти от изменения расхода жидкости и частоты вращения крыльчатки. Результаты расчетов хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными, что подтверждает адекватность использованной численной модели.

Ключевые слова: динамический гидроциклон, центробежный сепаратор, разделение водонефтяной эмульсии, численное моделирование.

VERIFICATION NUMERICAL MODEL OF THE SEPARATION PROCESS OIL-WATER EMULSIONS IN CENTRIFUGAL SEPARATOR

¹Timerbaev A.S., ¹Taranova L.V.

¹Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia (625000, Tyumen, str. Volodarskogo, 38), e-mail: general@tsoгу.ru

Regarding current increase of well production water cut level, the great attention is paid nowadays to the problem of treating produced oily water used for injection into wells. To improve the efficiency of oily water treatment, a centrifugal separator with vane impellers is introduced. This work aims at verification of numerical model of oily water separation in a centrifugal separator by real experimentation with a variation of fluid flow and impeller speed. The calculations were made using OpenFOAM program. The most appropriate models were selected out of the prominent turbulence models for investigation. The experimental results provided visualization of swirling structures in distribution zone and determined efficiency of oil water separation in a centrifugal separator. They allowed to get the dependency between generating stable “twisted cord” of oil, flow changes and impeller speed. The calculations provided results well consistent with the received experimental data, which proves the adequacy of the used numerical model.

Keywords: dynamic hydrocyclone, centrifugal separator, separation oil-water emulsion, numerical simulation.

Процесс разработки нефтяных месторождений сопровождается закачкой в продуктивные пласты водяного агента с целью поддержания пластового давления и заданного уровня добычи нефти, что приводит к росту доли воды в составе продукции скважин. Обводнение продукции скважин нефтяных месторождений приводит к осложнению технологию добычи, сбора и подготовки нефти. Эти осложнения связаны с образованием водонефтяных эмульсий, обладающих высокими значениями вязкости и стойкостью к разрушению [1]. Актуальной проблемой на нефтепромыслах является подготовка подтоварной воды для ее последующего использования в системе поддержания пластового давления в соответствии с требованиями отраслевого стандарта. Стандартом регламентируется содержание эмульгированной нефти и твердых взвешенных частиц,

максимальные количества которых определяется с учетом проницаемости коллекторов продуктивных нефтяных пластов.

Одним из эффективных способов очистки воды является разделение в поле центробежных сил с использованием аппаратов гидроциклонного типа [2,4-6]. Ранее [2,3] для разделения водонефтяных смесей была предложена конструкция проточного центробежного сепаратора с импеллером (крыльчаткой), разработана его компьютерная модель и выполнено численное моделирование процесса разделения. По результатам исследований выработаны рекомендации для оптимизации конструкции сепаратора с целью повышения эффективности его работы и определены параметры работы (расход и частота вращения крыльчатки) для формирования устойчивой «вихревой нитки» нефти. Но для использования результатов компьютерного моделирования численная модель должна быть верифицирована физическим экспериментом.

В этой связи, **целью** настоящей работы явилась проверка результатов численного моделирования процесса разделения водонефтяной смеси в центробежном сепараторе и адекватности предложенной модели, путем проведения реального эксперимента в сопоставимых условиях. В задачи исследования входило: разработка экспериментальной модели сепаратора и установки с его использованием; численное моделирование процесса и экспериментальные исследования при варьировании параметров процесса разделения с оценкой эффективности разделения и сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными.

Результаты исследования и их обсуждение

Основываясь на результатах предыдущих исследований [3] для решения поставленных задач была модернизирована и изготовлена экспериментальная модель сепаратора и установка для проведения исследований процесса сепарации при варьировании расхода жидкости на входе и частоты вращения крыльчатки.

Экспериментальная установка (рис.1) представляет собой замкнутый гидравлический контур, состоящая из центробежного сепаратора; емкостей для исходной смеси и продуктов разделения смеси; центробежного насоса производительностью 0,5-2,2м³/ч и напором 0,2-0,4 бар; системы подводящих и отводящих трубопроводов; запорной арматуры и манометров. Исследование осуществляли при следующих геометрических режимных параметрах: внутренний диаметр центробежного сепаратора – 32мм, длина зоны разделения 200-400 мм, скорость входящего потока 0,5-3 м/с. Численное моделирование и натурный эксперимент проводили при варьировании расхода входящего потока в пределах 0,5-2,2м³/ч и скорости вращения турбинки в пределах 500-3000 об/мин; содержание нефти в исходной воде составляло 5% масс. Анализ проб воды на остаточное содержание нефти в воде для оценки эффективности процесса проводили в соответствии с ОСТ-39-133-81.

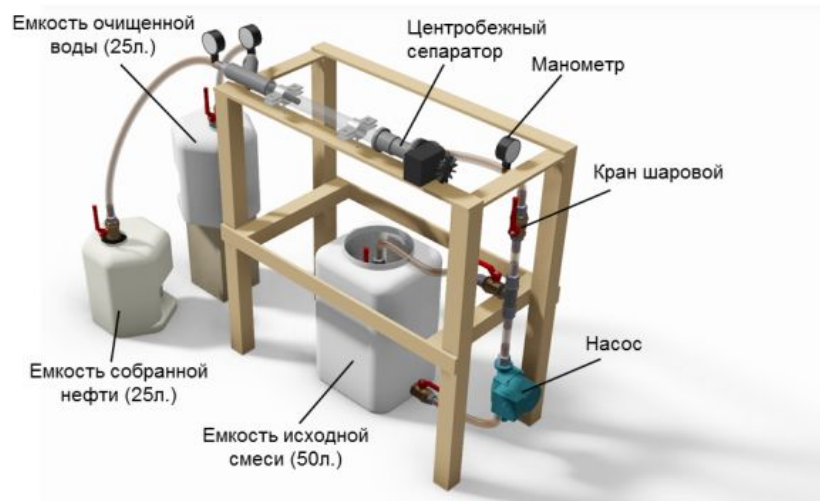


Рис. 1. 3D-модель экспериментальной установки

Численное моделирование процесса разделения производили с использованием программы OpenFOAM. Для построения геометрической и сеточной моделей был использован программный комплекс SALOME с использованием MRF-подхода. Вращение ротора для многофазных расчетов моделировалось методом подвижных систем отсчета. Учет турбулентности во всех расчетах проводился RANS-методом (методом напряжений Рейнольдса) с использованием $k\omega$ -SST модели [3].

При проведении численного моделирования сепарации водонефтяной смеси и натурального эксперимента была получена визуализация структуры вихревого «жгута» нефти, выполнена верификация расчетной модели и определена эффективность работы сепаратора с учетом изменении расхода входящего потока и скорости вращения турбинки. Расчеты позволили определить параметры, при которых происходит формирование «жгута» нефти в объеме смеси; натуральный эксперимент показал, что процессу формирования «жгута» предшествуют формирование «облака» нефти и «облака со жгутом».

Расчетным путем были определены условия формирования «жгута» нефти в исследованном диапазоне расходов и скорости вращения крыльчатки – расход 1,0-2,2 м³/ч; частота вращения – 2000-3000 об/мин, причем, с увеличением расхода для эффективного разделения требуется меньшая частота вращения и наоборот.

Сопоставим результаты моделирования и натурального эксперимента в сравнимых условиях. На рис. 2 представлена расчетная и экспериментально наблюдаемая структура вихревого «жгута» нефти. В связи с тем, что структура потока имеет периодический характер, для сравнения используются картины течения в разные моменты времени, но с нахождением «жгута» нефти в одной фазе. Сопоставление опытных и расчетных визуализаций, как видно, указывают на удовлетворительное их соответствие.

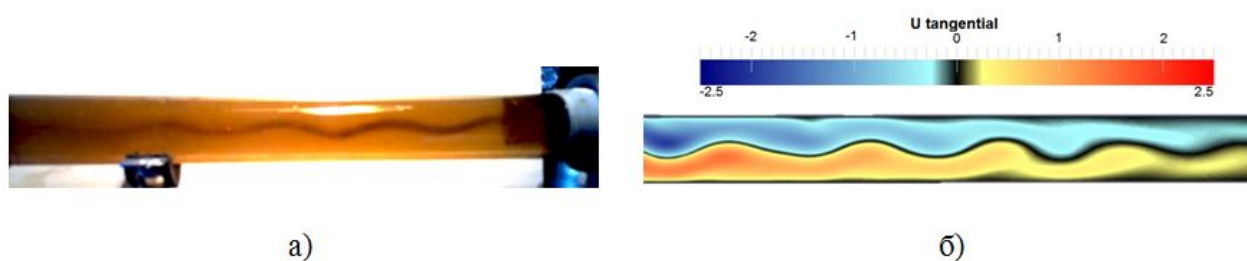


Рис 2. Мгновенная картина течения
а) эксперимент, б) расчет

По результатам визуализации можно видеть формирование стабильного вихревого «жгута» нефти, причем ось вихря совершает колебания относительно среднего положения, но в целом данная структура является неподвижной. Частицы нефти при этом движутся вдоль оси, совершая, спиральное движение.

Экспериментальные исследования показали, что в процессе разделения водонефтяной смеси в центробежном сепараторе можно выделить несколько стадий (рис.3).

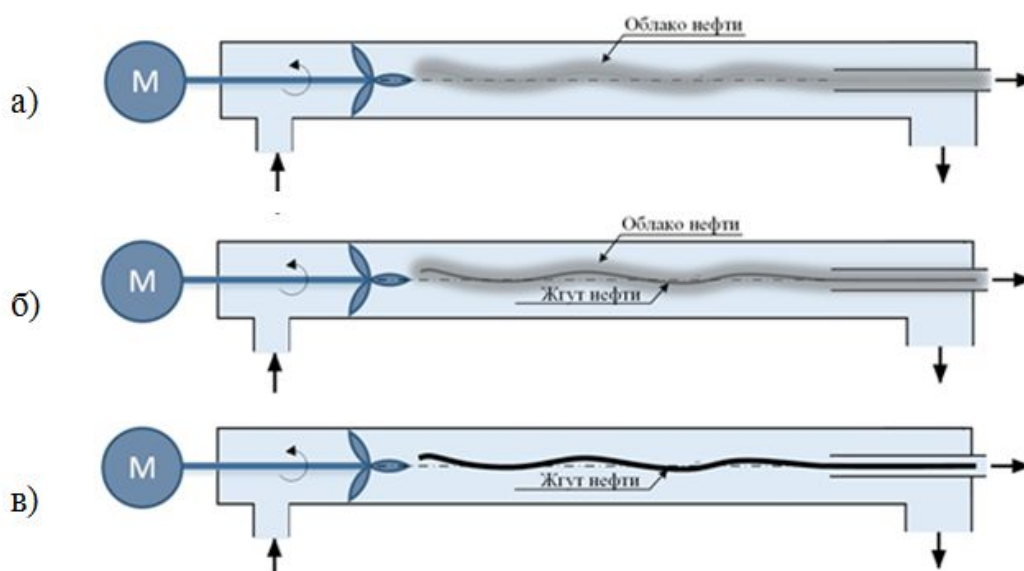


Рис. 3. Структура вихревого «жгута» нефти в зависимости от режима работы сепаратора
а) формирование «облака» нефти, б) формирование в облаке жгута нефти,
в) формирование «жгута» нефти

При неизменности расхода смеси и повышении частоты вращения турбинки сначала происходит формирование «облака» нефти из наиболее крупных капелек нефти, содержащихся в воде. При дальнейшем увеличении частоты вращения более крупные капли нефти смещаются к оси аппарата и образуют вихревой «жгут» нефти, тем временем меньшие капли собираются в «облако» вокруг образовавшегося жгута нефти. На третьей стадии капельки нефти, размер которых составляет более 50 мкм (согласно результатам моделирования), перемещаются к оси аппарата и образуют цельный «жгут» нефти.

Изменение структуры потока по результатам численного моделирования и экспериментальным данным представлены на рис. 4.

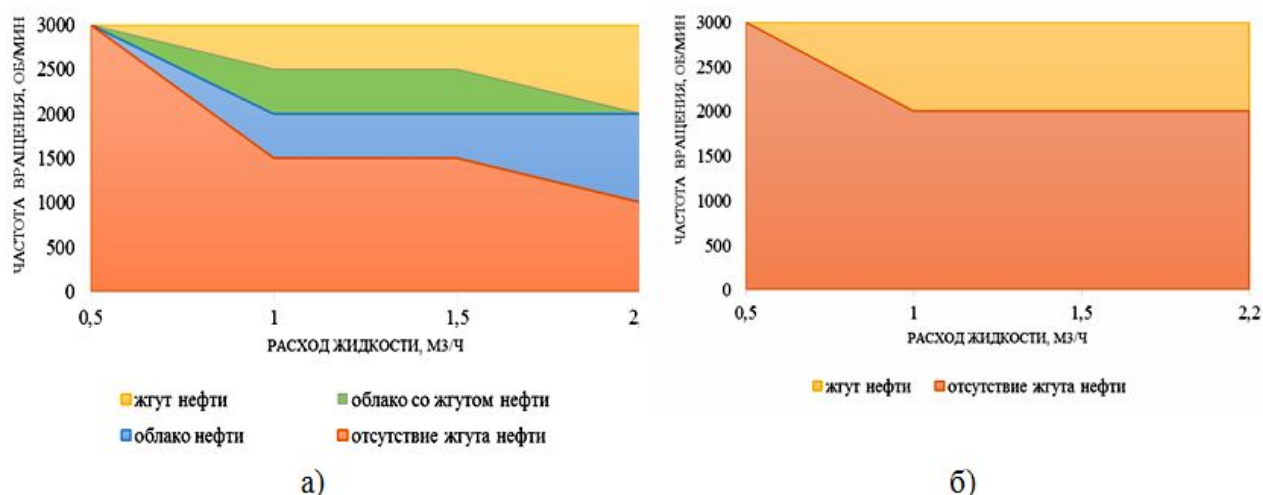


Рис. 4. Структура вихревого «жгута» нефти в зависимости от режима работы сепаратора
а) эксперимент, б) расчет

Представленные результаты показывают, что расчетная модель охватывает две стадии изменения структуры потока, наблюдаемые в условиях эксперимента: формирование «жгута» нефти в «облаке» (зеленая область) и формирование устойчивого вихревого «жгута» нефти (желтая область). Моделью не учитывается образование «облака» нефти (синяя область). Отсутствие процесса разделения смеси в красной области объясняется несогласованностью расходов со скоростью вращения турбинки для данной конструкции и, как следствие, рециркуляцией потока. В целом можно заключить, что предложенные модели удовлетворительно описывают процесс разделения водонефтяной смеси в центробежном сепараторе.

Результаты расчетов и экспериментальных исследований показывают, что качественному разделению водонефтяной смеси (формирование устойчивого «жгута») способствует увеличение расхода (более 1 м³/ч), что позволяет осуществлять процесс при меньшем числе оборотов (2000 об/мин).

Для оценки эффективности процесса разделения водонефтяной смеси при различных параметрах процесса рассчитали степень очистки, сопоставив расчетные данные с экспериментальными (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение расчетной и экспериментальной эффективности сепарации

Объемный расход смеси, м³/ч	Число оборотов крыльчатки, об/мин	Эффективность очистки воды от нефти, %		
		Расчет	Эксперимент	Погрешность, %
1	3000	37,0	35,3	4,8
1,5	2500	38,3	36,9	3,8
	3000	42,6	41,5	2,7
2,2	2500	49,8	47,8	4,2
	3000	52,9	52,1	1,5

Приведенные данные свидетельствуют об удовлетворительном соответствии опытных и расчетных данных. Значения расчетных параметров отличаются от экспериментальных на величину погрешности, которая может быть обусловлена двумя причинами. Во-первых, погрешность численного эксперимента связана с дискретизацией исходных непрерывных уравнений гидродинамики и применением моделей турбулентности, которые являются упрощенным представлением реальных гидродинамических процессов. С этой погрешностью трудно бороться, так как ее уменьшение требует значительного увеличения вычислительных ресурсов и экономически не обосновано. Более того, погрешность носит систематический характер и может быть учтена применением поправочных коэффициентов. Во-вторых, погрешность связана с неполным учётом в модели факторов, присутствующих в физическом эксперименте, в частности, таких как процесс дробления/укрупнения частиц нефти в потоке, механические потери мощности на валу двигателя, утечки жидкости по щелевым уплотнениям и пр. Для устранения данной погрешности необходимо проведение дополнительных испытаний.

По итогам работы можно заключить, что модели, предложенные для описания процесса центробежного разделения водонефтяных эмульсий, удовлетворительно описывают процессы, протекающие в разработанной конструкции сепаратора, что позволяет изучать и оптимизировать процесс при ограниченных возможностях экспериментального образца аппарата относительно интервалов варьирования параметров.

Выводы

Таким образом, в рамках данной работы с помощью численного моделирования и проведения экспериментального исследования изучен процесс разделения водонефтяной смеси в центробежном сепараторе при различных значениях частоты вращения крыльчатки и расхода входящего потока и исследовано изменение структуры потока в зависимости от режима работы сепаратора.

Сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными показало обоснованность применения MRF-подхода и метода подвижных систем отсчета, что позволяет в достаточной мере адекватно предсказать характеристики закрученного потока и эффективность сепарации в центробежном сепараторе с крыльчаткой. Это позволит оптимизировать параметры процесса, распространив их за пределы возможностей опытной экспериментальной установки.

Список литературы

1. Антипин Ю.В., Валеев М.Д., Сыртланов А.Ш. Предотвращение осложнений при добыче обводненной нефти. Уфа: Башк. кн. изд-во, 1987. 168 с.
2. Тимербаев А.С. Исследование физико-химического способа очистки воды для систем ППД

с применением центробежного сепаратора с крыльчаткой// Всероссийская научно-практическая конференция “Новые технологии – нефтегазовому региону”/ Сборник трудов в 2-х томах. Т. 2; – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. - 284 с.

3. Тимербаев А.С., Таранова Л.В. Численное моделирование процесса разделения водонефтяных эмульсий в центробежном сепараторе// Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9 (часть 3). – стр. 547-551;

4. 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)-P. 1110-1116.

5. Jones, P.S. A Field Comparison of Static and Dynamic Hydrocyclone// SPE Production and Facilities.- 1993-P. 84-90.

6. 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-P. 295-298.

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.