УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ ЖИДКИХ СИСТЕМ ПРИ СБОРЕ ПЛАСТОВОЙ ЖИДКОСТИ

INCREASING EFFICIENCY OF LIQUID SYSTEMS SEPARATION FOR FORMATION FLUID GATHERING

М. Я. Хабибуллин

Marat Ya. Khabibullin

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет, филиал,
г. Октябрьский,
Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Branch, Oktyabrsky,
Russian Federation

Совершенствованию процессов качественного и производительного сепарирования жидких неоднородных систем в нефтегазодобывающей промышленности уделяется значительное внимание как со стороны производителей, так и научных работников. Для осуществления этих операций применяются различные виды конструкций отстойников, сепараторов, гидроциклонов и т.д., принцип действия которых основан на гравитационном и центробежном разделении неоднородных масс различной плотности. Следует отметить, что при конструировании сепараторов с высоким значением индекса производительности в недостаточной степени удается использовать многочисленные теоретические исследования в области гидромеханики течения в центробежном поле. Это объясняется крайней сложностью условий течения разделяемой жидкости во внутривихревом пространстве. Поэтому в настоящее время большое значение приобрели экспериментальные исследования внутривихревых потоков. Так, экспериментально было показано, что при интенсификации процесса разделения нельзя изолированно изучать работу отдельных частей ротора, а нужно рассматривать работу системы, включающей пакет тарелок, шламовое пространство, фугатные каналы и выгружающее устройство.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что повышение производительности сепараторов за счет увеличения их размеров приблизилось к пределу, и использование имеющихся еще некоторых резервов в этом направлении, очевидно, сопряжено с необходимостью преодоления больших и неоправданных трудностей. Дальнейшее развитие этого направления нерационально. Однако существует путь интенсификации процесса сепарирования за счет выравнивания распределения внутривихревых и внутривихревых потоков, усовершенствования пакетов, устранения флотационного эффекта и деструкции дисперсной фазы, адаптации режима работы сепараторов в зависимости от изменений свойств разделяемой жидкости. В промышленных условиях, например при очистке высокопарафинистой пластовой жидкости, в гидроциклоне образуются корки, периодически забивающие выгрузочное отверстие. С целью обеспечения лучших гидродинамических условий процесса разделения пластовой жидкости в гидроциклоне и исключения забивки выгрузочного отверстия предложен аппарат, содержащий только цилиндрическую часть корпуса. Особенностью предложенной конструкции является то, что оптимальное соотношение длины к диаметру находится в диапазоне 3–5 при прочих соотношениях других используемых в расчете характеристик, равных соотношениям характеристик в

Ключевые слова

жидкостной сепаратор;
гидроциклон;
производительность;
центробежное поле; ротор

известных гидроциклонах. Такая длина гидроциклона обеспечивает условия эффективного разделения пластовой жидкости и вывода сгущенной фракции через выгрузочное отверстие.

Полученные результаты исследований, выполненных на реальном продукте при давлении и расходе, соответствующих производственным, позволили спроектировать и изготовить промышленный образец аппарата. Экспериментальные данные могут быть использованы для расчета подобных гидроциклонов, предназначенных для работы и на других смесях.

Considerable attention is paid to the improvement of the processes of high-quality and productive separation of liquid heterogeneous systems in the oil and gas industry from both manufacturers and scientists. To carry out these operations, various types of designs of sedimentation tanks, separators, hydrocyclones, etc. are used, the principle of operation of which is based on gravitational and centrifugal separation of inhomogeneous masses of various densities. It should be noted that when designing separators with a high value of the performance index, it is insufficiently possible to use numerous theoretical studies in the field of hydromechanics of flow in a centrifugal field. This is due to the extreme complexity of the conditions for the flow of the separated fluid in the rotor space. Therefore, experimental studies of intra-rotor flows have become very important at present. So, it was experimentally shown that, during the intensification of the separation process, it is impossible to study the operation of individual parts of the rotor separately, but it is necessary to consider the operation of the system, including the plate package, sludge space, high-pressure channels and an unloading device. Thus, we can conclude that the increase in the performance of separators due to the increase in their size has approached the limit and the use of some more reserves in this direction is obviously associated with the need to overcome great and unjustified difficulties. Further development of this direction is irrational. However, there is a way to intensify the separation process by equalizing the distribution of the rotor and batch flows, improving the packages, eliminating the flotation effect and the destruction of the dispersed phase, adapting the operating mode of the separators depending on changes in the properties of the separated liquid. In industrial conditions, for example, when cleaning a highly paraffinized formation fluid, crusts form in the hydrocyclone, periodically clogging the discharge hole. In order to ensure the best hydrodynamic process conditions for the separation of formation fluid in a hydrocyclone and to prevent clogging of the discharge outlet, an apparatus is proposed that contains only the cylindrical part of the housing. A feature of the proposed design is that the optimal ratio of length to diameter is in the range of 3–5 with other ratios of other characteristics used in the calculation, equal to the ratios of characteristics in known hydrocyclones. This length of the hydrocyclone provides the conditions for the effective separation of the reservoir fluid and the withdrawal of the condensed fraction through the discharge opening.

The obtained results of studies performed on a real product at pressure and flow rate, corresponding to the production ones, made it possible to design and manufacture an industrial model of the apparatus. The experimental data can be used to calculate similar hydrocyclones intended for use in other mixtures.

Совершенствованию процессов качественного и производительного сепарирования жидких неоднородных систем в нефтегазодобывающей промышленности уделяется значительное внимание как со стороны производителей, так и научных работников. Для осуществления этих операций применяются различные виды конструкций отстойников, сепараторов, гидроциклонов и т.д., принцип

действия которых основан на гравитационном и центробежном разделении неоднородных масс различной плотности.

В жидкостных сепараторах поверхность разделения формируется пакетом конических тарелок. Как известно, их производительность определяется значением индекса производительности, определяемым по формуле [1, 2]:

Key words

liquid separator; hydrocyclone;
productivity;
centrifugal field; rotor

$$\Sigma Q = \frac{2\omega^2 V}{g}, \quad (1)$$

где ω — угловая частота вращения ротора сепаратора, мин^{-1} ;

V — объем, ограниченный рабочей поверхностью разделения и замыкающей его плоскостью, м^3 ;

g — ускорение свободного падения, м/с^2 .

Естественным путем увеличения ΣQ является увеличение как размеров (диаметра и высоты), так и числа тарелок. Однако в конечном счете это ведет к недопустимому увеличению высоты ротора, ухудшающему динамические характеристики сепараторов, и росту неравномерности питания пакета по высоте. Известно, что современные соотношения между диаметром и высотой роторов продиктованы многолетним опытом и подкреплены теоретическими соображениями в части оптимальных динамических характеристик сепараторов. Увеличение числа тарелок возможно как за счет некоторого увеличения высоты ротора, так и за счет уменьшения зазора между тарелками для отдельных разделяемых жидкостей. Объем, ограниченный одной тарелкой раздельного пакета при ее постоянной форме, можно выразить в виде произведения aR_T^3 , где a — коэффициент пропорциональности; R_T — наибольший радиус тарелки. Тогда

$$\Sigma Q = \frac{2aR_T^3 z \omega^2}{g}, \quad (2)$$

где z — число тарелок в пакете.

Учитывая, что рабочая линейная скорость наиболее удаленных от оси вращения точек ротора $v = \omega R$ (здесь R — радиус ротора), и условно приняв, что количество тарелок пропорционально R , получим

$$\Sigma Q = \frac{2a_1 v^2 R^2}{g}, \quad (3)$$

где a_1 — новый коэффициент пропорциональности, равный отношению суммарного объема, ограниченного всеми тарелками, к R^4 .

Для дальнейших выкладок используем понятие допустимого значения критерия прочности быстровращающихся узлов:

$$[Ne] = \frac{[\sigma]}{\rho v^2}, \quad (4)$$

где $[\sigma]$ — допускаемое напряжение для материала ротора, МПа;

ρ — плотность материала, кг/м^3 ;

$[\sigma]/\rho = \gamma$ — удельная прочность материала.

Тогда

$$\Sigma Q = 2\gamma a_1 R^2 / \{g[Ne]\}. \quad (5)$$

Значение $[Ne]$ для вращающегося стального цилиндрического ротора, заполненного водой, можно принять равным 2 [3, 4]. При этом получим

$$\Sigma Q = a_1 R^2 / g. \quad (6)$$

Из последнего выражения следует, что производительность сепаратора при заданной линейной скорости ротора может быть повышена соответствующим увеличением радиуса тарелки, а, следовательно, и ротора.

Из выражения для критерия $[Ne]$ вытекает, что

$$\vartheta^2 = (\omega R)^2 = \gamma[Ne] = \text{const};$$

$$\omega = \frac{1}{R} \sqrt{\gamma[Ne]}. \quad (7)$$

Удельная прочность материала представляет собой квадрат окружной скорости разрушения вращающегося тонкого кольца, выполненного из того же материала. Обозначив линейную безопасную скорость через ϑ_d формулу (7) при $[Ne] = 2$ можно записать в виде

$$\omega = 0,71 \frac{\vartheta_d}{R}. \quad (8)$$

Для цилиндрического ротора при заданных значениях плотности его материала и разделяемой жидкости в работе [5] приводится зависимость:

$$s/R = f([Ne]), \quad (9)$$

где S — толщина стенки ротора.

На основании этой зависимости нами построена зависимость отношения ϑ_d/ϑ от отношения s/R (рисунок 1).

Воспользуемся примером, приведенным в работе [6]. Требуется спроектировать ротор, внутренний радиус которого 0,346 м, вращающийся с частотой 4500 об/мин. Допускаемое напряжение $[\sigma] = 450$ МПа. Линейная скорость поверхности ротора на радиусе 0,316 м равна 163 м/с, в то время как безопасная скорость $\vartheta_d \leq 239,4$ м/с. Отношение $\vartheta_d/\vartheta = 1,47$.

Данному отношению на рисунке 1 соответствует отношение $s/R = 0,08$, следовательно, толщина стенки будет $s = 27,7$ мм.

Как следует из анализа рисунка 1, минимуму отношения $\vartheta_d/\vartheta = 1,325$ соответствует отношение $s/R = 0,175$. Следовательно, имеется возможность при том же значении ϑ_d увеличить скорость в $1,47/1,325 = 1,1$ раза (т.е. на 10 %), но при этом толщина стенки увеличится в $0,175/0,08 = 2,2$ раза (соответственно также увеличится и масса ротора). Из рисунка 1 видно, что дальнейшее увеличение рабочей скорости (когда $1,325 \vartheta > \vartheta_d$) исключено.

Рисунок 1. Зависимость отношения ϑ_d/ϑ безопасной скорости к рабочей отношения s/R толщины стенки к радиусу ротора

Резерв увеличения скорости ротора возможен за счет снижения разрушающей скорости. Если воспользоваться преобразованной формулой для вероятности неразрушения, приняв нормальное распределение прочности материала ротора, можно написать [7]

$$P = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_b^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \quad (10)$$

$$\text{где } b = \frac{K_{\vartheta}^2 - 1}{\sqrt{\vartheta_s^2 K_{\vartheta}^4 + \vartheta_{si}^2}};$$

P — вероятность безотказной работы ротора;

K_{ϑ}^4 — запас прочности по скорости;

$\vartheta_s = 0,19$, коэффициент вариации удельной прочности ротора для стали;

ϑ_{si} — коэффициент вариации квадрата скорости ротора, который принимается равным 0.

Рассчитывая для различных значений K_{ϑ}^4 значения b , найдем по стандартной методике [8] величины вероятности неразрушения ротора (таблица 1).

На рисунке 2 приведен график $P = f(K_{\vartheta})$.

Итак, резерв увеличения скорости ротора возможен за счет снижения значения разрушающей скорости и, следовательно, понижения его надежности.

Как видно, достаточная безопасность работы обеспечивается при запасе по скорости 1,41, что соответствует двукратному запасу прочности. В этом случае только четыре ротора из 1000 могут разрушиться. Однако при

Таблица 1. Величины вероятности неразрушения ротора

K_{ϑ}^4	1,41	1,35	1,3	1,25	1,2	1,15	1,1
P	0,9957	—	0,9842	—	0,9463	0,8997	0,8186

Рисунок 2. Зависимость вероятности неразрушения P ротора от запаса прочности по скорости K_{ϑ}

уменьшении запаса по скорости до 1,1 вероятность безопасности работы снизится до 0,8186, т.е. повышение значения допускаемой скорости только на 31 % приводит к значительному возрастанию вероятности разрушения, так как при этом уже могут разрушиться почти 20 % роторов. На рисунке 3 представлены зависимости диаметра ротора от частоты его вращения на основании равенства (7) для двух значений вероятности P безотказной работы ротора, выполненного из материала, указанного в примере. На рисунке 3 точками обозначены параметры $D = f(n)$ ряда современ-

ных сепараторов. Как видно, большинство точек располагается вблизи нижней кривой. График позволяет выявить границу области современного сепараторостроения по значениям диаметров роторов (показана штриховой линией). Дальнейшее заметное увеличение диаметра ротора, например до 1500 мм, вероятно, будет связано с поиском новых конструктивных форм сепараторов, отказом от их традиционной конструктивной схемы. Это связано с серьезными конструктивными проработками и значительной перестройкой производственной базы.

1 — SA-160-06-117; 2 — МДА-300; 3 — СДС-901 К-01; 4 — MRPX-418; 5 — SB-80-36-076; 6 — СДС-530К-1; 7 — SB-60-36-076; 8 — СДС-531К-01; 9 — SAMR5036M; 10 — СОС-501К-3

Рисунок 3. Зависимость диаметра D ротора от частоты вращения n различных сепараторов (штриховой линией очерчена граница современного сепараторостроения)

Ранее было показано [9], что неравномерность питания влечет за собою снижение индекса производительности иногда в 2 раза и более. Неравномерность питания неоднократно изучалась, и предлагались способы ее уменьшения [10]. Влияние неравномерности питания по высоте пакета должно учитываться как при увеличении числа тарелок, так и при их изготовлении с учетом необходимости точного соблюдения выбранного зазора между ними.

Следует отметить, что при конструировании сепараторов с высоким значением индекса производительности в недостаточной степени удается использовать многочислен-

ные теоретические исследования в области гидромеханики течения в центробежном поле. Это объясняется крайней сложностью условий течения разделяемой жидкости во внутриворотном пространстве. Поэтому в настоящее время большое значение приобрели экспериментальные исследования внутриворотных потоков. Так, экспериментально было показано [11], что при интенсификации процесса разделения нельзя изолированно изучать работу отдельных частей ротора, а нужно рассматривать работу системы, включающей пакет тарелок, шламовое пространство, фугатные каналы и выгружающее устройство.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что повышение производительности сепараторов за счет увеличения их размеров приблизилось к пределу, и использование имеющихся еще некоторых резервов в этом направлении, очевидно, сопряжено с необходимостью преодоления больших и неоправданных трудностей. Дальнейшее развитие этого направления нерационально.

Однако существует путь интенсификации процесса сепарирования за счет выравнивания распределения внутрироторных и внутрипакетных потоков, усовершенствования пакетов, устранения флотационного эффекта и деструкции дисперсной фазы, адаптации режима работы сепараторов в зависимости от изменений свойств, разделяемой жидкости.

В нефтяной промышленности применяются различные виды гидроциклонов для разделения пластовой жидкости, очистки сточных вод. Обычно гидроциклон представляет собой цилиндрический корпус, переходящий в конический у выгрузочного отверстия, с тангенциальным вводом жидкой фазы и центральным сливным патрубком.

В общем случае профиль тангенциальных скоростей жидкости изменяется по закону

$$v_{\varphi} r^n = \text{const}, \quad (11)$$

где v_{φ} — тангенциальная скорость в пристенной области, м/с;

r — радиус гидроциклона, м;

n — показатель степени.

По данным различных авторов, показатель степени n изменяется в пределах от -1 до 1 . На тангенциальную скорость в гидроциклоне влияют его геометрические параметры, конусность корпуса и организация вывода сгущенной фракции.

В промышленных условиях, например при очистке высокопарафинистой пластовой жидкости, в гидроциклоне образуются корки, периодически забивающие выгрузочное отверстие. С целью обеспечения лучших гидродинамических условий процесса разделения пластовой жидкости в гидроциклоне и исключения забивки выгрузочного отверстия предложен аппарат (рисунок 4), содержащий только цилиндрическую часть корпуса [12]. Выгрузочное отверстие образовано за счет размещения в нижней части гидроциклона конического вытеснителя. В корпусе гидроциклона имеются тангенциальный штуцер для ввода пластовой жидкости, сливной патрубков, конический вытеснитель, штуцер сгущенной

фракции, отбойные кольца и устройства для ручного или автоматического открытия выгрузочного отверстия. Наличие конического вытеснителя обеспечивает поддержание оптимальных гидродинамических условий по всей длине L аппарата — от вводного до выгрузочного отверстия. Конусность вытеснителя влияет на профиль распределения тангенциальных скоростей жидкости в пристенной области, позволяя сохранить постоянными профиль скоростей по радиусу и удельный расход по сечению аппарата.

1 — корпус; 2 — штуцер; 3 — сливной патрубков; 4 — отбойные кольца; 5 — конический вытеснитель; 6 — штуцер сгущенной фракции; 7, 8 — устройства соответственно для автоматического и ручного регулирования проходного сечения выгрузочного отверстия

Рисунок 4. Конструкция гидроциклона

На рисунке 5 приведены данные, полученные при работе гидроциклонов. Были исследованы вытеснители с углом конусности 25° , 35° , 43° , 45° и 50° с одним и двумя отражательными кольцами, а также гладкие. Наружный диаметр колец составлял $1,2-1,8$ диаметра конуса в месте их установки. В опытах установлено, что наиболее эффективно гидроциклоны работают при наличии двух отражательных колец диаметром $1,45-1,5$ диаметра конуса в этом сечении. Оптимальное расстояние между кольцами равно $0,7-0,8$ среднего диаметра конуса между ними. При этом оптимальный угол конусности вытеснителя γ лежит в интервале $35-43^\circ$. Отклонение угла на 5° от оптимального интервала приводит к существенному снижению степени

Рисунок 5. Зависимость содержания твердых частиц C в сливе от расхода суспензии V

очистки в гидроциклоне (примерно на 5–6 %). Степень очистки пластовой жидкости от частиц при оптимальных параметрах аппарата составляла в опытах 96–99 %.

Наилучшие показатели работы гидроциклона получены при содержании твердых частиц в исходной пластовой жидкости не более 3 г/л.

Математическая обработка экспериментальных результатов позволила получить данные по изменению тангенциальной скорости жидкой фазы в аппарате, которые согласуются с результатами, приведенными в работе [12]. Тангенциальная скорость жидкости в пристенной области может быть определена по формуле [13]

$$\frac{v_{\varphi}}{v_{\text{вх}}} = 3,1 \left(\frac{d_{\text{вх}}}{D} \right) \left(\frac{L}{D} \right)^{-0,32}, \quad (12)$$

где $v_{\text{вх}}$ — скорость суспензии на входе в гидроциклон, м/с;

$d_{\text{вх}}$ — эквивалентный диаметр вводного прямоугольного сопла, м;

СПИСОК ИСПОЛЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хабибуллин М.Я., Сидоркин Д.И. Определение параметров колебаний колонны насосно-компрессорных труб при импульсной закачке жидкостей в скважину // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. 2016. Т. 3. № 3. С. 27–32. DOI: 10.5510/OGP20160300285.
2. Персиянцев М.Н. Совершенствование процессов сепарации нефти от газа в промысловых условиях. М.: Недра-Бизнесцентр, 1999. 282 с.

D — диаметр гидроциклона, м.

Особенностью предложенной конструкции является то, что оптимальное соотношение $L/D = 3–5$ при прочих соотношениях других используемых в расчете характеристик, равных соотношениям характеристик в известных гидроциклонах. Такая длина гидроциклона обеспечивает условия эффективного разделения пластовой жидкости и вывода сгущенной фракции через выгрузочное отверстие.

Вывод

Полученные результаты исследований, выполненные на реальном продукте при давлении и расходе, соответствующих производственным, позволили спроектировать и изготовить промышленный образец аппарата. Экспериментальные данные могут быть использованы для расчета подобных гидроциклонов, предназначенных для работы и на других смесях.

3. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Selection of Optimal Design of a Universal Device for Nonstationary Pulse Pumping of Liquid in a Reservoir Pressure Maintenance System // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Vol. 54. Issue 3–4. P. 225–232. DOI: 10.1007/s10556-018-0467-2.

4. Сахавутдинов Р.З., Шаталов А.Н., Гарифуллин Р.М. Технологии очистки нефти от сероводорода // Нефтяное хозяйство. 2008. № 7. С. 82–86.

5. Синайский Э.Г., Ляпина Е.Я., Зайцев Ю.В. Сепарация многофазных многокомпонентных систем. М.: Недра-Бизнесцентр, 2002. 621 с.

6. Хабибуллин М.Я. Исследование процессов, происходящих в колонне труб при устьевой импульсной закачке жидкости в скважину // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16. № 6. С. 34-39. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39.

7. Alforyov V.I., Bagirov L.A., Dmitriev L.M., Feygin V., Imayev S., Lacey J.R. Supersonic Nozzle Efficiently Separates Natural Gas Components // Oil and Gas Journal. 2005. Vol. 103. No. 20. P. 53-58.

8. Vu V.K., Fantoft R., Shaw C.K. Comparison of Subsea Separation Systems // Proceedings Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA. 2009. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-20080-MS> (дата обращения: 11.01.2020). DOI: 10.4043/20080-MS.

9. Хабибуллин М.Я. Систематизированный подход к методам закачки воды в нагнетательные скважины // Нефтегазовое дело. 2019. Т. 17. № 3. С. 80-86. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-3-80-86.

10. Тимербаев А.С., Таранова Л.В. Численное моделирование процесса разделения водонефтяных эмульсий в центробежном сепараторе // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-3. С. 547-551.

11. Терновский И.Г., Кутепов А.М. Гидроциклонирование. М.: Наука, 1994. 350 с.

12. Хабибуллин М.Я., Сулейманов Р.И. Повышение надежности сварных соединений трубопроводов в системе поддержания пластового давления // Нефтегазовое дело. 2019. Т. 17. № 5. С. 93-98. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-93-98.

13. Guo G. Deng S. Research on Dispersed Oil Droplets Breakage and Emulsification in the Dynamic Oil and Water Hydrocyclone // Advance Journal of Food Science and Technology. 2013. Vol. 5. Issue 8. P. 1110-1116.

REFERENCES

1. Khabibullin M.Ya., Sidorkin D.I. Opredelenie parametrov kolebaniy kolonny nasosno-kompressornykh trub pri impul'snoi zakachke zhidkostei v skvazhinu [Determination of Tubing String Vibration Parameters under Pulsed Injection of Fluids into the Well]. *Nauchnye trudy NIPI Neftegaz GNKAR — SOCAR Proceedings*, 2016, Vol. 3, No. 3, pp. 27-32. DOI: 10.5510/OGP20160300285. [in Russian].

2. Persiyantsev M.N. Sovershenstvovanie protsessov separatsii nefiti ot gaza v promyslovyykh usloviyakh [Improving Oil-Gas Separation Processes in the Field]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 1999. 282 p. [in Russian].

3. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Selection of Optimal Design of a Universal Device for Nonstationary Pulse Pumping of Liquid in a Reservoir Pressure Main-

tenance System. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 54, Issue 3-4, pp. 225-232. DOI: 10.1007/s10556-018-0467-2.

4. Sakhabutdinov R.Z., Shatalov A.N., Garifullin R.M. Tekhnologii ochistki nefiti ot serovodoroda [Technologies of an Oil Cleaning from Hydrogen Sulphide]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 2008, No. 7, pp. 82-86. [in Russian].

5. Sinaiskii E.G., Lyapina E.Ya., Zaitsev Yu.V. Separatsiya mnogofaznykh mnogokomponentnykh sistem [Separation of Multiphase Multicomponent Systems]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2002. 621 p. [in Russian].

6. Khabibullin M.Ya. Issledovanie protsessov, proiskhodyashchikh v kolonne trub pri ust'evoi impul'snoi zakachke zhidkosti v skvazhinu [Research of Processes in a Pipe String at a Wellhead Pulse Injection of Liquid to a Well]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 16, No. 6, pp. 34-39. DOI: 10.17122/ngdelo2018-6-34-39. [in Russian].

7. Alforyov V.I., Bagirov L.A., Dmitriev L.M., Feygin V., Imayev S., Lacey J.R. Supersonic Nozzle Efficiently Separates Natural Gas Components. *Oil and Gas Journal*, 2005, Vol. 103, No. 20, pp. 53-58.

8. Vu V.K., Fantoft R., Shaw C.K. Comparison of Subsea Separation Systems. Proceedings Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 2009. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-20080-MS> (accessed 11.01.2020). DOI: 10.4043/20080-MS.

9. Khabibullin M.Ya. Sistematizirovannyi podkhod k metodam zakachki vody v nagnetatel'nye skvazhiny [Systematization of Methods of Water Injection in Wells]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2019, Vol. 17, No. 3, pp. 80-86. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-3-80-86. [in Russian].

10. Timerbaev A.S., Taranova L.V. Chislennoe modelirovanie protsessa razdeleniya vodonefityanykh emul'sii v tsentrobeznom separatore [Numerical Simulation Separation Oil-Water Emulsions in Centrifugal Separator]. *Fundamental'nye issledovaniya — Fundamental Research*, 2014, No. 9-3, pp. 547-551. [in Russian].

11. Ternovskii I.G., Kutepov A.M. *Gidrotsiklonirovanie* [Hydrocyclone]. Moscow, Nauka Publ., 1994. 350 p. [in Russian].

12. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Povyshenie nadezhnosti svarnykh soedinenii truboprovodov v sisteme podderzhaniya plastovogo davleniya [Increasing the Reliability of Welded Pipeline Connections in Reservoir Pressure Maintenance System]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2019, Vol. 17, No. 5, pp. 93-98. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-93-98. [in Russian].

13. Guo G. Deng S. Research on Dispersed Oil Droplets Breakage and Emulsification in the Dynamic Oil and Water Hydrocyclone. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2013, Vol. 5, Issue 8, pp. 1110-1116.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ABOUT THE AUTHOR

Хабибуллин Марат Яхиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Нефтепромысловые машины и оборудование», УГНТУ, филиал, г. Октябрьский, Российская Федерация

Marat Ya. Khabibullin, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Oil and Gas Field Machines and Equipment Department, Branch, USPTU, Otkyabrsky, Russian Federation

e-mail: m-hab@mail.ru