

УДК 622.245

Разработка оборудования и технологии для кавитационно-импульсного воздействия на пласт в условиях нефтяных месторождений компании "Белоруснефть"

Д.В. Ткачев (заведующий Лабораторией интенсификации добычи нефти), **А.В. Серебренников** (первый заместитель директора – главный инженер, канд. техн. наук) (РУП "Производственное объединение "Белоруснефть" БелНИПинефть), **В.М. Ткачев** (заместитель декана) (Учреждение образования "Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого")

В статье описаны опыт разработки и эксплуатации устройства и технологии для комплексной обработки добывающих скважин на основе гидродинамического кавитационного волнового воздействия на прискважинную зону нефтегазовых пластов. Приведены результаты модельных исследований спроектированного пульсатора с построением распределения полей скоростей, направлений линий тока и соотношения жидкой и газовой фаз в моделируемой области скважины. Показана эффективность применения пульсатора для кислотных обработок скважин глубиной более 2000 м. Стендовые и опытно-промышленные испытания подтвердили ожидаемые положительные результаты. Принимая в расчёт эффективные и среднеэффективные работы по применению технологии кавитационно-импульсного воздействия на пяти объектах компании "Белоруснефть", успешность составила 80 %. Прирост коэффициента продуктивности в относительном выражении до 60 %.

Падение дебитов эксплуатируемых скважин и ввод в эксплуатацию месторождений со сложными геологическими условиями заставляют уделять всё большее внимание современным технологиям интенсификации добычи нефти и повышения нефтеотдачи пласта за счет различных физических, химических и, в первую очередь, комплексных методов воздействия.

К числу наиболее перспективных способов интенсификации добычи нефти и повышения нефтеотдачи пласта относятся технологии волнового воздействия на прискважинную зону и пласт (ПЗП), которые обеспечивают без нарушения физико-химических характеристик коллекторов и конструкций скважин эффективное выполнение поставленных задач и гарантируют экологическую безопасность процесса. Кроме того, популярность таких методов обуславливается их простотой, дешевизной и оперативностью применения и высоким экономическим эффектом от внедрения.

Среди всего многообразия устройств внимания заслуживают именно гидродинамические генераторы упругих колебаний. Для их функционирования требуется лишь штатное нефтепромысловое оборудование – устьевые насосные агрегаты. Режимные напорно-расходные параметры последних весьма велики, что позволяет при достаточно высоком КПД гидродинамического генератора создавать на забое скважины естественную энергонапряженность упругого колебательного поля [1].

В российских и зарубежных источниках предложено значительное количество устройств, использующих колебательные эффекты затопленных струй в режиме развитой кавитации [2].

Перед авторами ставилась задача разработать устройство для комплексной обработки добывающих скважин путем гидродинамического кавитационного волнового воздействия на прискважинную зону нефтегазовых пластов. Разрабатываемое оборудова-

ние должно совмещаться со штатными промышленными операциями подземного и капитального ремонта скважин и с операциями большинства традиционных методов обработок ПЗП (кислотные, пенокислотные и другие), с минимальными при этом затратами при реализации геолого-технических мероприятий.

Приступая к разработке любого устройства, необходимо четко определить круг решаемых с его использованием задач, выделить конструктивные и технологические особенности разрабатываемого устройства. Так, на первом этапе проектирования были сформулированы основные требования: устройство должно возбуждать в призабойной зоне, заполненной скважинным флюидом, достаточно высокоамплитудные низкочастотные колебания давления в диапазоне частот 1...300 Гц, частоты и амплитудный режим генерации должны мало зависеть от внешних условий и степени износа отдельных элементов, в конструкции необходимо исключить подвижные механические узлы как наиболее подверженные износу, в особенности в условиях загрязненной и агрессивной жидкой среды, значительно снижающие их общий моторесурс.

Наиболее полно набору основных требований удовлетворяют гидродинамические генераторы колебаний, построенные на основе вихревых элементов, которые работают в автоколебательных режимах. Важнейшее преимущество использования вихря как усиливающего элемента состоит в том, что он имеет максимальный, по сравнению со всеми другими струйными элементами, коэффициент усиления по мощности [3].

С учетом основных требований, а также в рамках поставленной задачи совместными усилиями специалистов БелНИПИнефть и ГГТУ им. П.О. Сухого (РБ) разработана конструкция скважинного гидродинамического пульсатора-кавитатора ПГД-3. В разработанном оборудовании вихревой поток жидкости является усилителем низкочастотных колебаний рабочих параметров жидкости (давления и скорости). Гидродинамический пульсатор-кавитатор обеспечивает создание и вынос за пределы устройства кавитационных пузырьков и каверн, попадая в зону высокого давления, они схлопываются, создавая пульсационные потоки высокой интенсивности. При схлопывании кавитационных пузырьков у входа в поровый канал возникает эффект "фокусировки" ударной микроволны, пробивающей кольматирующие прискважинную зону тромбы.

На первом этапе, непосредственно перед созданием опытного образца пульсатора, было выполнено численное динамическое моделирование работы устройства и процессов, протекающих в скважинных условиях при его работе [4].

В целях оптимизации конструктивных параметров и изучения возможности возникновения кавитационных пульсаций в скважинных условиях проведено исследование влияния расхода жидкости через пульсатор и гидростатического (пластового) давления на гидродинамические характеристики потока. Для опи-

сания структуры турбулентного движения жидкой среды используют осредненные уравнения неразрывности и Навье – Стокса, которые позволяют вычислить среднее давление и компоненты вектора средней скорости рабочей среды в моделируемой области. Для расчета многофазного течения использовались модель Эйлера и математическая модель динамики сферической каверны Релея – Плессета с учетом вязкости, сил поверхностного натяжения, влияния газа в каверне, близости границ твердой стенки и давления соседних пузырьков.

По результатам расчетов строились распределения полей скоростей, направлений линий тока, давлений и соотношения жидкой и газовой фаз в моделируемой области скважины при различных давлениях и расходах. По модельным исследованиям были определены оптимальные режимы, при которых возможно образование устойчивой кавитации, и динамические параметры кавитационных процессов.

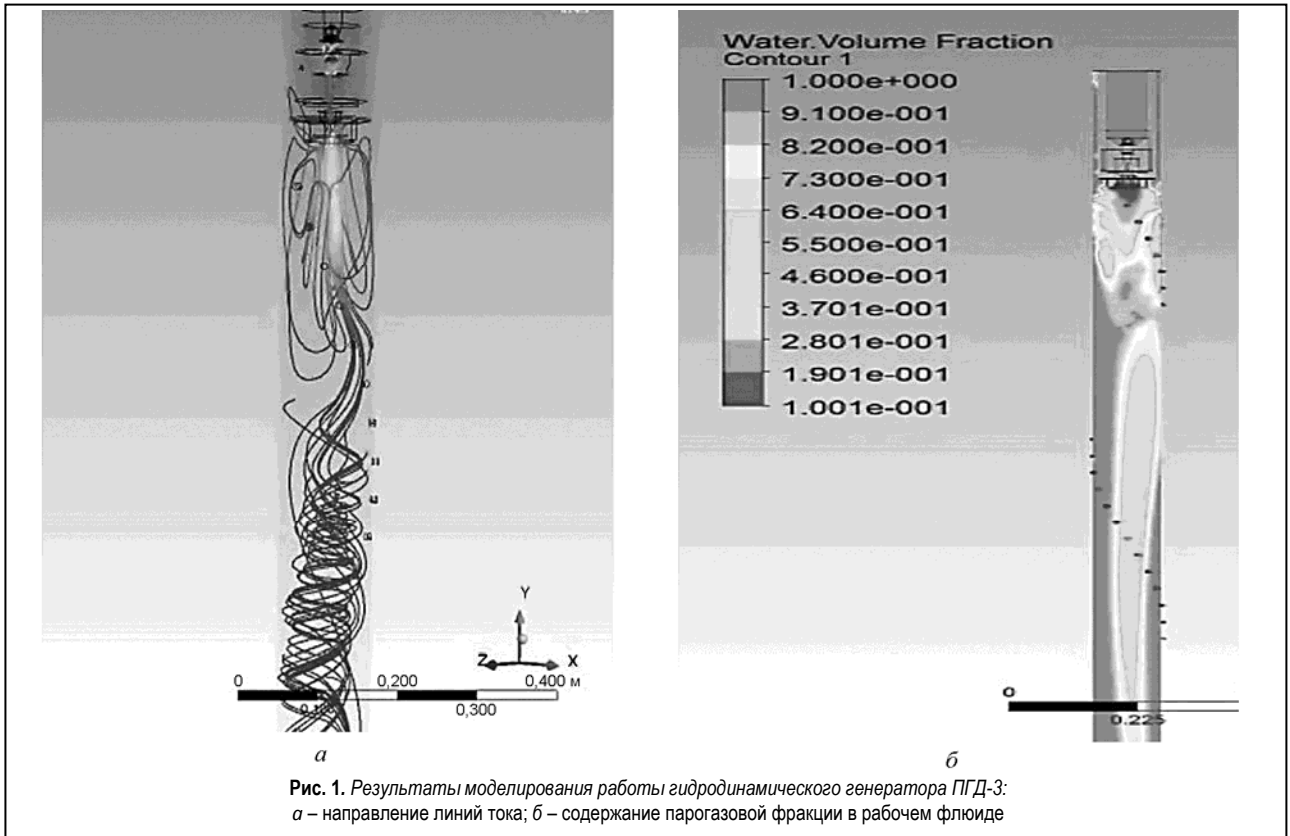
Из расчетов сделан вывод, что получить эффект развитой кавитации на глубине свыше 2000 м затруднительно при использовании в качестве рабочей жидкости воды [2]. В этом случае целесообразно применять пакерное оборудование, чтобы снизить воздействию гидростатического давления, а также проводить дополнительное насыщение рабочей жидкости газом для стимуляции образования кавитационных полостей в сплошности рабочей жидкости. Однако наилучший эффект достигается при совмещении кавитационно-импульсной обработки с реагентной, так как давление насыщенных паров раствора соляной кислоты значительно выше, чем у воды, и, соответственно, увеличивается содержание парогазовой фракции, а следовательно, и эффект воздействия кавитации.

Один из примеров расчета показан на рис. 1.

На рис. 1, б видно, что на значительном расстоянии от выходного отверстия сопла пульсатора объемная доля парогазовой фракции составляет порядка 50 %, а в непосредственной близости – до 90 %. Данный факт подтверждает ожидаемую работоспособность устройства. Так, согласно результатам модельных испытаний, в отличие от ранее известных конструкций разработанный генератор ПГД-3 позволяет создавать амплитудные колебания давления 1...5 МПа в низкочастотном диапазоне, обеспечивающем медленное затухание на удалении от обсадной колонны.

Анализ данных, полученных в результате модельных испытаний устройства, дал возможность провести оптимизацию конструкции пульсатора с целью достижения максимального КПД и стабильности его работы.

Следующий этап работ заключался в создании опытного образца пульсатора и проведении его стендовых испытаний с целью проверки работоспособности и безаварийности работы устройства, возможности создания режима устойчивой пульсации рабочей среды, изучения особенностей функционирования устройства в различных режимах, а также определе-



ния рабочих параметров полученных режимов и их соответствия модельным испытаниям.

Стендовые испытания кавитатора были проведены в октябре 2012 г. на испытательной площадке БелНИПИнефти. Образец испытываемого устройства закреплялся в стенде и с помощью линии высокого давления подсоединялся к насосному агрегату, после чего к испытываемому устройству подавалась рабочая жидкость от насосного агрегата (рис. 2). Испытания проводились при различных давлениях в линии нагнетания с имитацией пластовых условий за счет создания подпора в испытательной камере стенда различными штуцерами с диаметрами проходных отверстий 4, 6 и 8 мм.

С целью исключить влияние внешних факторов на регистрируемые параметры непосредственно перед испытанием пульсатора выполнялась запись фона работы насосного агрегата. Стендовые испытания подтвердили факт работы ПГД-3, но и выявили некоторые конструктивные недостатки предложенной конструкции. В связи с этим конструкция пульсатора подверглась доработке, в частности, была изменена геометрия проблемных элементов в целях увеличения механической прочности, что не оказало влияния на параметры работы пульсатора.

Переходя к стадии промысловых испытаний технологическая схема работ в скважинных условиях может быть выполнена тремя способами:

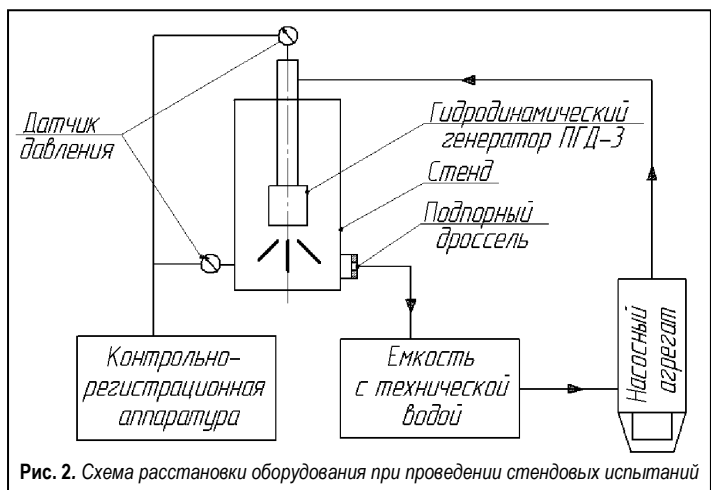
- обработка интервала перфорации путём

перемещения кавитатора на подвеске НКТ (БДТ) при циркуляции рабочей жидкости по затрубному пространству с расходом 3...10 л/с;

- закачка реагента в пласт в режиме развитой кавитации при закрытом затрубном пространстве или посаженном пакере;
- комплексная обработка пласта путём последовательной реализации первых двух типов.

Селективно-точечную обработку пласта по первому типу проводят с шагом 0,5...1 м с воздействием в течение 10...30 мин при постоянной циркуляции, при этом расход жидкости создают в пределах 3...10 л/с.

Компоновка инструмента для выполнения воздействия на пласт по второму типу спускается в следующей последовательности снизу вверх: пульсатор ПГД-3 с за-



бойным манометром, 2-3 трубки НКТ, пакер (при необходимости) и остальные НКТ до устья скважины. Пульсатор-кавитатор целесообразно устанавливать в зоне интервала перфорации или открытого ствола со сниженными фильтрационными характеристиками коллектора, после чего выполняют кавитационно-импульсное ПАВ-кислотное воздействие с заданным расходом в режиме развитой кавитации по технологии кислотной обработки ПЗП.

В 2013-2014 гг. реализована программа опытно-промысловых работ по отработке технологии кавитационно-импульсного воздействия (КИВ) с применением пульсатора-кавитатора ПГД-3 на нефтяных месторождениях Республики Беларусь. Учитывая большие глубины залегания продуктивных горизонтов на месторождениях РБ, применение технологии реализовывалось в комплексе с реагентной обработкой пласта при посаженном пакере. Воздействие осуществлялось на компоновке НКТ (снизу вверх) с пульсатором ПГД-3, регистратором забойных параметров РЗП-100 и пакером ПРО-ЯМО2-ЯГ1(М). После посадки пакера в пласт в импульсном режиме закачивали ПАВ-кислотный состав при различных режимных характеристиках 2...7 л/с. Высокие значения давления закачки рабочей жидкости (30...40 МПа) соответствовали расчетным при заданных расходах (2,5...5,5 л/с), что подтверждает значительный перепад давления при прохождении рабочей жидкости через пульсатор (перепад давления на пульсаторе порядка 18...20 МПа). Полученный перепад давления на пульсаторе также соответствовал результатам стендовых испытаний.

Данные, полученные в результате расшифровки манометрической записи, показывают наличие пульсаций давления рабочей жидкости (рис. 3). Амплитудно-частотная характеристика, построенная с помощью преобразований Фурье, показала наличие гармоник с частотами в диапазоне 1...25 Гц и амплитудой 0,2...1,1 МПа. При этом необходимо учитывать тот факт, что регистратор забойного давления при проведении кавитационно-импульсного воздействия был расположен выше гидродинамического пульсато-

ра ПГД-3 (чтобы не препятствовать формированию очагов высокого давления и не нарушать линий тока рабочей жидкости после пульсатора) и регистрировал незначительную локальную разрядку давления внутри НКТ, тогда как максимум амплитуды пульсации давления рабочей жидкости, возникающей в результате схлопывания кавитационных каверн, происходил ниже пульсатора и приходился на интервал перфорации.

Таким образом, зарегистрированные перепады давления малой амплитуды косвенно свидетельствуют в пользу создания режима устойчивой кавитации и работоспособности устройства, но не могут отразить энергетику процесса в целом. Кроме того, полученная частота пульсаций давления рабочей жидкости полностью совпадает с результатами модельных и стендовых испытаний.

Ревизия пульсатора ПГД-3 после интенсифицирующего воздействия показала минимальный износ его конструктивных элементов и высокую ремонтпригодность. Ресурс работы основных элементов (тангенциальный завихритель, резонансная камера) в условиях агрессивных сред составил не менее трех скважино-операций.

Для оценки экономического эффекта от кавитационно-импульсного воздействия проводились гидродинамические исследования до и после проведения работ по интенсификации притока путём записи КВД. На основании прироста коэффициента продуктивности проводился факторный расчёт дополнительной добычи нефти. В таблице представлены результаты внедрения технологии.

Дополнительная добыча за счёт внедрения технологии кавитационно-импульсного воздействия на 5 объектах составила около 6640 т. Принимая в расчёт эффективные и среднеэффективные работы, успешность составляет 80 %. Прирост коэффициента продуктивности в относительном выражении до 60 %. Наибольший эффект достигается в скважинах с продуктивностью ниже 1 м³/(сут×МПа). Эффективность работ увеличивается при нормальной энергетике залежи, что характерно для ГТМ по интенсификации.

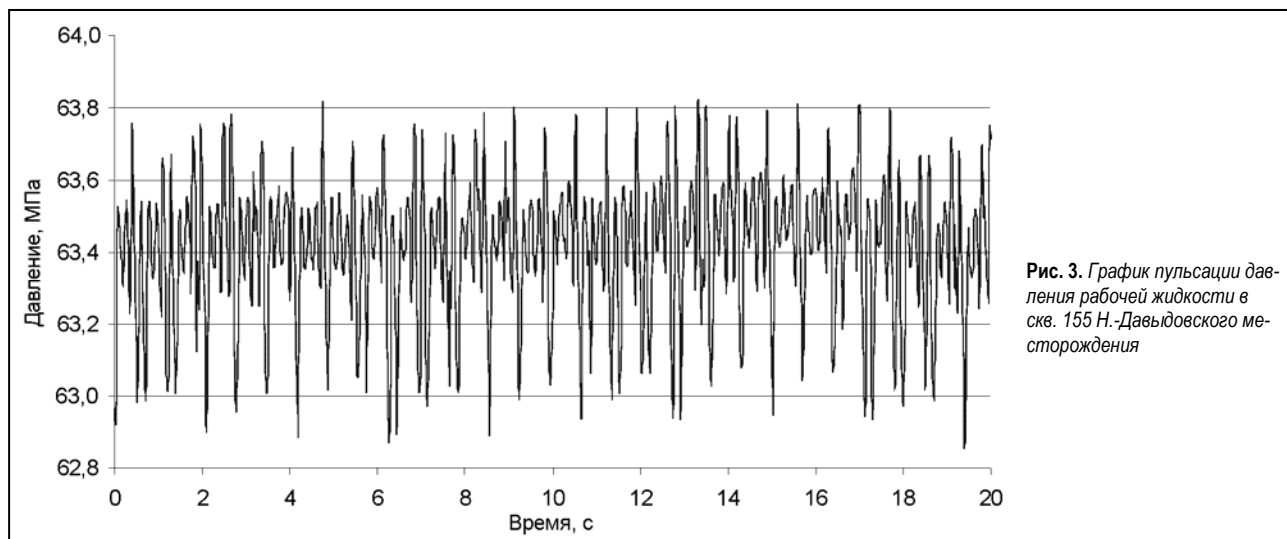


Рис. 3. График пульсации давления рабочей жидкости в скв. 155 Н.-Давыдовского месторождения

Сравнительный анализ эффективности от кавитационно-импульсного воздействия с традиционными технологиями: простыми и направленными кислотными обработками, по объектам на аналогичных месторождениях и залежах, показал эффект в среднем выше на 30 %.

Расчёт эффективности внедрения оборудования для кавитационно-импульсного воздействия за 2013–2015 гг.

Номер скважины, месторождение	Дата окончания ремонта	Базовый дебит, т/сут	Планный прирост, т/сут	Фактический прирост в год внедрения, т/сут	Дополнительная добыча, т
155, Н.-Давыдовское	04.2013	2,17	3,0	3,9	751
14, Н.-Кореневское	12.2013	6,13	4,0	6,08	1237
276, Осташковичское	01.2014	6,49	3,0	11,66	3596
151, Мармовичское	02.2014	3,24	3,0	4,17	742
147, Березинское	09.2014	3,56	2,0	2,9	314
Итого					6640

В результате проведенных на месторождениях Республики Беларусь опытно-промышленных испытаний определены основные критерии применимости технологии, определяющие эффективность её использования:

- карбонатные пласты-коллекторы нагнетательных и добывающих скважин с проницаемостью свыше 5 мД и обводнённостью добываемой продукции последних не более 70%, расчленённые и послойно неоднородные, с возможным наличием неработающих зон и пропластков;

- для работы пульсатора ПГД-3 в устойчивом кавитационно-импульсном режиме, в процессе химической обработки пласта, приёмистость скважины должна составлять не менее 3...5 л/с при заданном рабочем давлении;

- с учетом физических особенностей протекания кавитационных процессов для обработки глубокозалегающих пластов (глубиной более 2000 м) рекомендуется включать в компоновку пакер, вне зависимости от значений давлений, при которых достигается необходимая для создания устойчивой кавитации приёмистость пласта;

- с учетом величины и характера распределения градиента импульсов давления в области скважины, расположенной под пульсатором, рекомендуемая толщина целевого интервала не должна превышать 20...25 м при условии работы в режиме "закачка" и не ограничена в режиме обработки "на циркуляцию";

- важным условием безаварийности проведения работ с использованием пульсатора ПГД-3 являются качественная предварительная подготовка (очистка)

кислотных емкостей, мерных емкостей насосных агрегатов, а также отсутствие механических примесей в рабочей жидкости: уровень КВЧ не более 50 мг/л и размер частиц твёрдой фазы не более 3 мм.

В настоящее время на месторождениях Республики Беларусь технология получила промышленное внедрение и применяется согласно вышеозначенным критериям для интенсификации притока скважин, где "простые" кислотные обработки не дают желаемого результата, а также при освоении из бурения новых скважин.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия / В.П. Дыбленко, Р.Н. Камалов, Р.Я. Шариффулин, И.А. Туфанов. – М.: Недра, 2000. – 382 с.*
2. *Интенсификация добычи нефти / Л.Х. Ибрагимов, И.Т. Мищенко, Д.К. Челоянц. – М.: Наука, 2000. – 414 с.*
3. *Омельянюк М.В. Гидравлические генераторы колебаний в нефтегазовом деле // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса: науч.-техн. журн. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2011. – № 3. – С. 54–60.*
4. *Моделирование гидродинамических процессов при кавитационно-импульсной кислотной обработке нефтедобывающих скважин / Д.В. Ткачев, А.И. Столяров, А.М. Селютин, В.М. Ткачев // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. X междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П.О. Сухому), Гомель, 23–24 окт. 2014 г. / Мин-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого, ОАО "Компания "Сухой" / под общ. ред. С.И. Тимошина. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2014. – С. 79–80.*

LITERATURA

1. *Povyshenie produktivnosti i reanimatsiya skvazhin s primeneniem vibrovonnogo vozdeystviya / V.P. Dyblenko, R.N. Kamalov, R.Ya. Shariffulin, I.A. Tufanov. – M.: Nedra, 2000. – 382 s.*
2. *Intensifikatsiya dobychi nefiti / L.X. Ibragimov, I.T. Mishchenko, D.K. Cheloyants. – M.: Nauka, 2000. – 414 s.*
3. *Omel'yanyuk M.V. Gidravlicheskie generatory kolebaniy v neftegazovom dele // Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa: nauch.-tekhn. zhurn. – M.: OAO "VNIIO-ENG", 2011. – № 3. – S. 54–60.*
4. *Modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov pri kavitatsionno-impul'snoy kislotnoy obrabotke neftedobyvayushchikh skvazhin / D.V. Tkachev, A.I. Stolyarov, A.M. Selyutin, V.M. Tkachev // Sovremennye problemy mashinovedeniya: tez. dokl. X mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (nauch. chteniya, posvyashch. P.O. Sukhomu), Gomel', 23–24 okt. 2014 g. / Min-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Gomel. gos. tekhn. un-t im. P.O. Sukhogo, OAO "Kompaniya "Sukhoj" / pod obshch. red. S.I. Timoshina. – Gomel': GGTU im. P.O. Sukhogo, 2014. – S. 79–80.*

РУП "Производственное объединение "Белоруснефть" БелНИПинефть

246003 Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Книжная, 15б.

E-mail: d.tkachev@beloil.by

Учреждение образования "Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого"

246746 Республика Беларусь, г. Гомель, просп. Октября, 48.

E-mail: vmtkachev@gstu.by