

УДК 622.276.6

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-57-66>

О ПРИМЕНЕНИИ ПУЛЬСАТОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРИЗАБОЙНУЮ ЗОНУ ПЛАСТА КАРБОНАТНЫХ ПОРОД КОЛЛЕКТОРОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

А. В. СЕРЕБРЕННИКОВ¹, Д. В. ТКАЧЁВ², А. И. ГАВРИЛЕНКО²,
П. М. ГАЛКО², В. М. ТКАЧЕВ³

¹Республиканское унитарное предприятие

«Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель

²Белорусский научно-исследовательский и проектный
институт нефти Республиканского унитарного
предприятия «Производственное объединение
«Белоруснефть», г. Гомель

³Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь

Приведены результаты научных исследований и практического применения оборудования и технологий гидроимпульсного воздействия на пласт с целью увеличения производительности добывающих и приемистости нагнетательных скважин. Показано, что для улучшения фильтрационных характеристик призабойной зоны предлагается применение способа импульсного воздействия различными вибрационными источниками, в результате чего в призабойной зоне пласта формируется и развивается сеть искусственных и естественных трещин. Наиболее эффективными и наиболее распространенными источниками низкочастотных колебаний в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» являются пульсаторы клапанного, кавитационного и ротационного типов. Пульсаторы клапанного типа позволяют создавать в призабойной и удаленной зонах пласта импульсы низкой частоты 0,5–20 Гц с амплитудой до 15 МПа и конструктивно регулировать начало пульсационного режима и амплитуду колебаний. Кавитационный пульсатор обеспечивает создание амплитудных колебаний давления в низкочастотном диапазоне. Ротационный пульсатор предоставляет возможность формировать импульсное круговое движение скважинной жидкости или химического реагента в зоне перфорации. Рассмотренные технологии гидроимпульсного воздействия с использованием разработанного в БелНИПИнефть оборудования показали свою эффективность, выраженную в полученной дополнительной добыче нефти, и технологичность применения.

Ключевые слова: скважинные технологии, интенсификация добычи нефти, виброволновое воздействие, пульсаторы, кислотные обработки.

Для цитирования. О применении пульсаторов при воздействии на призабойную зону пласта карбонатных пород коллекторов месторождений Республики Беларусь / А. В. Серебрянников [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 2 (97). – С. 57–66. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-57-66>

ON THE USE OF PULSATORS WHEN INFLUENCING THE BOTTOMHOLE ZONE OF CARBONATE ROCK FORMATIONS IN RESERVOIRS OF THE REPUBLIC OF BELARUS

A. V. SEREBRENNIKOV¹, D. V. TKACHEV², A. I. GAVRILENKO²,
P. M. GALKO², V. M. TKACHEV³

¹Republican Unitary Enterprise “Production Association
“Belorusneft”, Gomel

² *Belarusian Oil Research and Design Institute BelNIPIneft
Republican Unitary Enterprise “Production Association
“Belorusneft”, Gomel*

³ *Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

The authors present results of scientific research and practical application of equipment and technologies for hydropulse stimulation of the formation in order to increase the productivity of producing wells and susceptibility of injection wells. It is shown that in order to improve the filtration characteristics of the near-wellbore zone, it is proposed to use a method of pulsed action with various vibration sources. As a result a network of artificial and natural cracks is formed and develops in the near-wellbore zone of the formation. The most effective and most common sources of low-frequency vibrations in the Republican Unitary Enterprise “Production Association “Belorusneft” are pulsators of valve, cavitation and rotary types. Valve-type pulsators allow to create low-frequency pulses of 0.5–20 Hz with an amplitude of up to 15 MPa and constructively regulate the onset of the pulsation regime and the amplitude of oscillations in the near-wellbore and remote zones of the formation. The cavitation pulsator ensures the creation of amplitude pressure oscillations in the low-frequency range. A rotary pulsator makes it possible to generate a pulsed circular movement of a well fluid or a chemical reagent in the perforation zone. The considered hydraulic pulse technologies using equipment developed at BelNIPIneft have shown their effectiveness, expressed in the resulting additional oil production, and manufacturability of application.

Keywords: well technologies, intensification of oil production, vibration wave action, pulsators, acid treatments.

For citation. Serebrennikov A. V., Tkachev D. V., Gavrilenko A. I., Galko P. M., Tkachev V. M. On the use of pulsators when influencing the bottomhole zone of carbonate rock formations in reservoirs of the Republic of Belarus *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 2 (97), pp. 57–66 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-57-66>

Введение

Разработка новых и совершенствование существующих технологий интенсификации добычи нефти для условий нефтяных месторождений Республики Беларусь основываются на том, что большинство разрабатываемых месторождений находится на поздней (завершающей) стадии разработки.

Особо неблагоприятными с точки зрения извлечения запасов нефти являются неоднородные по фильтрационным свойствам и низкопроницаемые пласты, а также пласты, содержащие нефти с повышенной вязкостью и большим содержанием асфальтено-смолистых веществ. В таких условиях применяемые в настоящее время традиционные методы воздействия на призабойную зону пласта (ПЗП) в ряде случаев не приносят желаемых результатов. Особенно это проявляется при соляно-кислотных обработках карбонатных пластов с высокой послойной неоднородностью, в которых многократные обработки одних и тех же интервалов не только не дают ощутимого эффекта, но делают еще более неоднородным пласт по проницаемости, что приводит к снижению выработки продуктивных пластов. Наиболее перспективным направлением для увеличения нефтеотдачи вышеуказанных залежей является разработка комплексных технологий, включающих в себя сочетание физико-химических, тепловых, гидродинамических, импульсных и других интенсивных факторов воздействия.

В данной работе представлен опыт применения виброволнового воздействия на ПЗП при кислотных обработках с помощью пульсаторов различных конструкций. Рассматриваемые конструкции пульсаторов формируют низкочастотные импульсы как наиболее эффективные. Формирование импульсов низкой частоты в скважине происходит за счет прокачки через пульсаторы технологических жидкостей [1].

В РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» развитие и последующее внедрение получили следующие технологии импульсного воздействия на пласт:

– гидроимпульсное кислотное воздействие с использованием пульсатора клапанного типа;

- кавитационно-импульсное воздействие с применением пульсатора-кавитатора;
- струйно-импульсное воздействие с использованием пульсатора ротационного типа.

Основная цель данной работы – обобщение знаний, полученных в результате внедрения в промысловое производство пульсаторов различных конструкций, их ремонтпригодность и последующая оценка успешности проводимых геолого-технических мероприятий по интенсификации притока.

Гидроимпульсное кислотное воздействие

Технология гидроимпульсного кислотного воздействия (ГИКВ) на пласт основана на применении пульсаторов клапанного типа. Такие пульсаторы путем прокачки через них жидкости позволяют генерировать импульсы низкой и субнизкой частоты (0,5–30 Гц) с амплитудой импульсов давления до 15 МПа.

В источниках показано, что нижние области звуковых волн воздействуют на околоствольную зону пласта на глубину 1–2,5 м. Более глубокого воздействия можно достичь при использовании импульсов инфразвукового диапазона частот (0,5 до 20 Гц) [2].

В 2002 г. в БелНИПИнефть совместно с ГСКТБ ГА были разработаны пульсаторы-вибраторы клапанного типа В1 и В1-73 для реализации технологий ГИКВ и депрессионно-импульсного воздействия (ДИВ) на пласт. Типовая конструкция пульсатора-вибратора В1 показана на рис. 1.

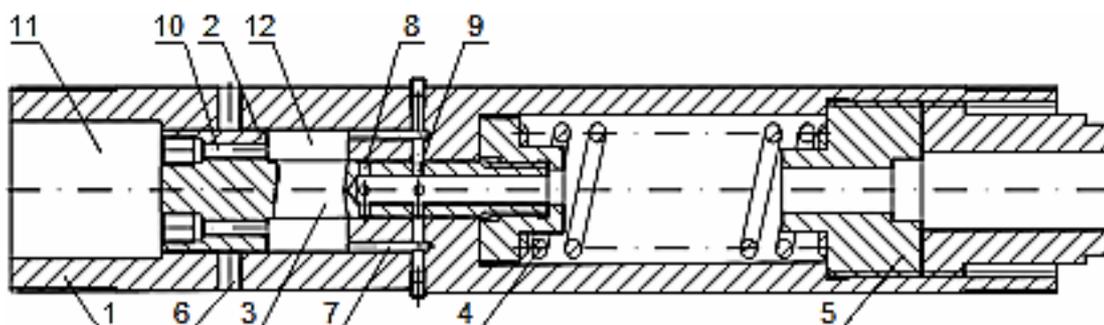


Рис. 1. Пульсатор-вибратор типа В1:

- 1 – корпус; 2 – поршень; 3 – шток; 4 – пружина; 5 – гайка; 6 – отверстие выпускное;
7 – канал подпоршневой; 8, 9 – отверстия радиальные; 10 – отверстие дроссельное;
11 – полость надпоршневая; 12 – полость подпоршневая

Основными конструктивными элементами пульсатора-вибратора, определяющими рабочие характеристики импульсного режима, являются поршень с перепадными дросселями (максимальное количество – 4) и пружина.

Максимальная амплитуда генерируемых импульсов достигается поджатием пружины, а частота импульсов давления – изменением расхода рабочей жидкости, подаваемой на пульсатор-вибратор. Расход подачи рабочей жидкости, при котором начинается пульсационный режим, задается подбором количества открытых дроссельных отверстий.

Конструктивно подбор количества дроссельных отверстий и пружины осуществлен таким образом, что при расходе рабочей жидкости до 1 л/с минимальный перепад давления на отверстиях не позволял сжать пружину. При этом рабочая жидкость подается по насосно-компрессорным трубам (НКТ) в надпоршневую полость и через отверстия дроссельные попадает в затрубное пространство в безпульсационном режиме. При повышении расхода подаваемой рабочей жидкости увеличивается и перепад давления на отверстиях дроссельных, происходит движение поршня до откры-

тия выпускных отверстий, а также импульсный сброс закачиваемой рабочей жидкости в затрубное пространство, и в зоне перфорации скважины возникает гидроударная волна большой амплитуды давления, распространяющаяся в пласт. После сброса давления поршень возвращается в исходное положение с закрытием выпускных отверстий, в результате чего давление в надпоршневой полости повторно возрастает до рабочего. При непрерывной подаче рабочей жидкости на пульсатор-вибратор процесс сброса давления рабочей жидкости повторяется, в жидкой среде затрубного пространства и перфорационных каналах зараждается импульсный процесс, передающийся на ПЗП и создающий сеть искусственных микротрещин.

Схема реализации ГИКВ представлена на рис. 2, в скважину спускается компоновка НКТ с пульсатором-вибратором и пакером. При воздействии на пласт через пульсатор-вибратор прокачивают рабочие растворы (кислота, растворители, растворы ПАВ и т. п.). При циклическом их движении образующиеся в жидкости колебательные процессы высокой амплитуды передаются на продуктивный пласт, что усиливает эффект воздействия от реагентов.

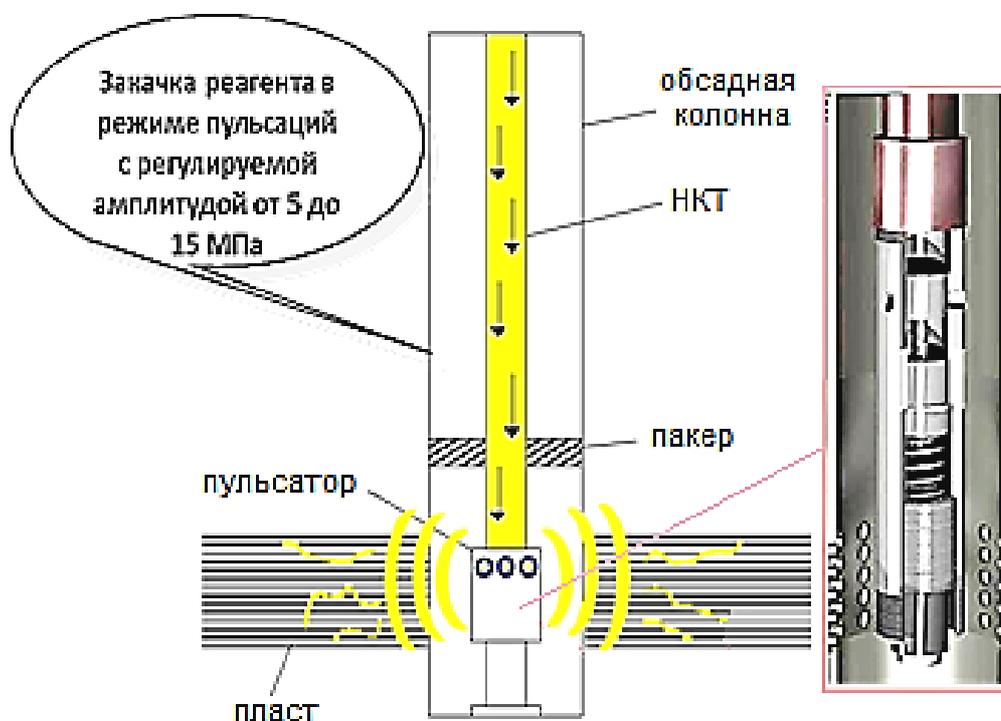


Рис. 2. Схема реализации гидроимпульсного кислотного воздействия на пласт

Работоспособность пульсаторов-вибраторов В1 и В1-73 была испытана как при стендовых испытаниях, так и в скважинных условиях при выполнении кислотного воздействия на пласт. С начала разработки оборудования и до 2015 г. для реализации технологии ГИКВ применялись пульсаторы-вибраторы клапанного типа В1, всего было выполнено около 20 скважино-операций. После 2015 г. в технологии стал использоваться пульсатор В1-73, разработанный для технологии ДИВ (применение в компоновке со струйным насосом), имеющий аналогичную конструкцию, но меньшие габаритные размеры, что позволяет производить работы в эксплуатационной колонне 102–114 мм [4].

Показатели эффективности работ с использованием пульсаторов различных типов в период 2016–2023 гг.

Номер скважины	Месторождение	Пласт	Дата ввода	Вид ГТМ	Технология	Используемое оборудование	Базовый дебит нефти, т/сут	Плановый дебит нефти, т/сут	Длительность эффекта, сут	Дополнительная добыча нефти, т	Прирост дебита нефти, т/сут	Средний дебит нефти, т/сут
Гидроимпульсное кислотное воздействие с использованием пульсатора клапанного типа В1-73												
56	Мармовичское	el-zd	28.01.2016	Интенсификация	ГИКВ	В1-73	2,89	4,89	775	1427	4,6	7,5
151	Ю-Сосновское	ptr-el-zd	31.12.2016	Интенсификация	ГИКВ	В1-73	3,09	6,09	520	885	1,7	4,8
72	Давыдовское	ptr-zd	05.01.2017	Освоение	ГИКВ	В1-73		12	334,3	8127		24,31
44	Малодушинское	sm-sr	18.09.2018	Освоение	ГИКВ	В1-73		15	101,2	2776		27,43
43	Малодушинское	sm-sr	02.01.2019	Освоение	ГИКВ	В1-73		30	360,6	11893		32,98
28	Судовицкое	ptr	20.02.2020	Переходы	ГИКВ	В1-73		5	310,8	1165		3,75
Кавитационно-импульсное кислотное воздействие с использованием пульсатора гидродинамического ПД-3												
71	Мармовичское	el-zd	05.02.2016	Интенсификация	КИВ	ПД-3	0,09	3,09	1616,5	11027	6,8	6,9
32	Надвинское	sm-sr	06.02.2016	Переходы	КИВ	ПД-3			140,4	102		0,73
155	Н-Давыдовское	el	26.04.2016	Интенсификация	КИВ	ПД-3	2,02	4,02	91,7	82	0,89	2,91
32	Речицкое	zd	18.02.2020	Переходы	КИВ	ПД-3М	0,55	4	65	115	1,8	2,38
135	Мармовичское	el	28.03.2020	Интенсификация	КИВ	ПД-3М	5,39	8	95,1	89	0,94	6,33
226	Ю-Осташковичское	ptr-zd	01.01.2023	Освоение	КИВ	ПД-3Мм		10	224,1	7338		32,74
276	Осташковичское	ptr-zd	12.01.2023	Интенсификация	КИВ	ПД-3Мм	6,23	8,8	233,4	783	3,4	9,63
222	Ю-Осташковичское	ptr-zd	16.03.2023	Освоение	КИВ	ПД-3Мм		10	182,1	1189		6,53
Струйно-импульсное кислотное воздействие с использованием пульсатора ротационного типа ПР-ТК												
5п	3-Сосновское	el	01.12.2019	Переходы	СИВ	ПР-ТК		5	707,2	3476		4,91
3	3-Сосновское	el	14.03.2020	Интенсификация	СИВ	ПР-ТК	3,69	6,69	1200,2	4005	3,34	7,03
25	Цкаловское	zd	01.04.2020	Интенсификация	СИВ	ПР-ТК	2,11	10,3	918,5	7191	7,8	9,91

С использованием пульсатора В1-73 в период 2016–2023 гг. было выполнено 6 скважино-операций при проведении работ по освоению после бурения, интенсификации притока и переходе на другой горизонт (см. таблицу). Стоит отметить, что по скважинам, введенным из бурения (72 Давыдовского, 43 и 44 Малодушинского месторождений), и после перехода на вышележащий интервал (28 Судовицкого месторождения) были практически достигнуты планируемые показатели эффективности. По интенсифицирующим объектам (56 Мармовичского и 151 Ю-Сосновского месторождений) при среднем базовом дебите нефти около 3 т/сут была получена дополнительная добыча нефти – в среднем 1100 т на 1 скважино-операцию.

Таким образом, промысловые испытания разработанного устройства – пульсатора-вибратора В1 (В1-73) и технологии ГИКВ на пласт позволили получить хорошие результаты. Технология показала себя эффективной и перспективной для широкого внедрения при интенсификации добычи нефти как в карбонатных, так и в терригенных пластах.

Кавитационно-импульсное воздействие

Устройства с использованием эффекта кавитации широко используются и российскими, и зарубежными нефтедобывающими компаниями для интенсификации добычи углеводородов [5, 6].

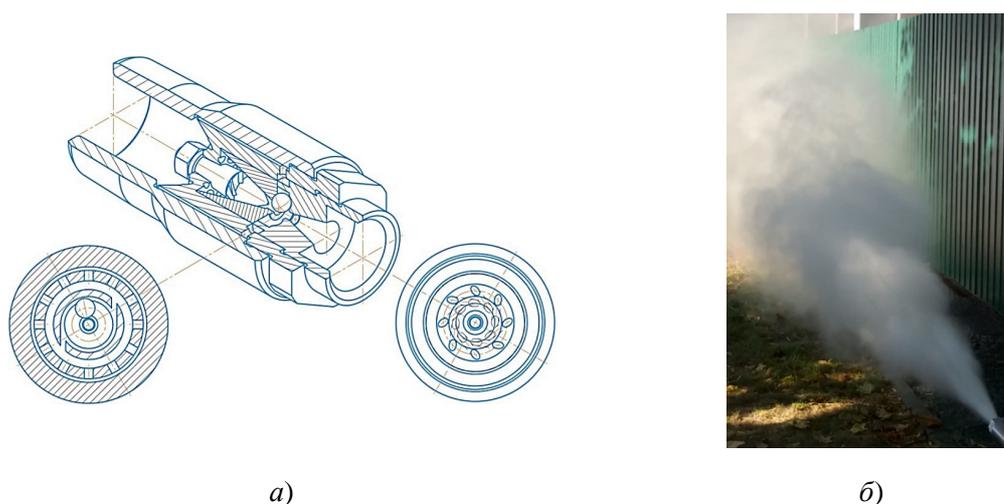
С учетом модельных исследований [7] и основных технологических и конструктивных требований к такому рода устройствам совместными усилиями специалистов БелНИПИнефть и ГГТУ им. П. О. Сухого была разработана конструкция скважинного гидродинамического пульсатора-кавитатора ПГД-3 [8, 9]. В разработанном оборудовании 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, где, попадая в зону высокого давления, они схлопываются, создавая низкочастотные пульсационные потоки высокой интенсивности, воздействующие на прискважинную зону и разрушающие кольматирующие тромбы.

Получить эффект развитой кавитации на глубине свыше 2000 м затруднительно при использовании в качестве рабочей жидкости воду [6]. Достичь желаемого результата удалось путем совмещения кавитационно-импульсного воздействия с реагентной обработкой кислотными составами. Давление насыщенных паров раствора соляной кислоты значительно выше чем у воды, что приводит к увеличению содержания парогазовой фракции и, как следствие, к достижению эффекта воздействия кавитации.

Конструкция разработанного пульсатора и изображение стендовых испытаний с явно выраженными пульсациями давления представлены на рис. 3.

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, по результатам которой данное оборудование было рекомендовано к применению.

По результатам промысловой эксплуатации пульсатора-кавитатора ПГД-3 внесены конструктивные изменения и разработана модификация ПГД-3М (2019 г) с доработанной вихревой камерой с целью усиления эффекта кавитации, а также изготовлен малогабаритный ПГД-3Мм (2021 г.) для возможности спуска в колонну диаметром 114 мм.



*Рис. 3. Пульсатор с вращающейся струей:
а – конструкция пульсатора; б – стендовые испытания*

В период 2016–2023 гг. с использованием пульсаторов-кавитаторов типа ПГД было выполнено 8 скважино-операций (см. таблицу). Низкой эффективностью характеризуются работы по скважинам 32 Надвинского и 32 Речицкого месторождений при переходах на другой интервал/горизонт, также по скважинам 155 Н-Давыдовского и 135 Мармовичского месторождений при интенсификации притока. По скважинам 71 Мармовичского и 276 Осташковичского месторождений при интенсификации притока, а также 222 и 226 Ю-Осташковичского месторождения при освоении после бурения получены высокие показатели по добыче нефти после проведенных работ. При этом на 3-х (из 4-х высокоэффективных) объектах работы по технологии КИВ выполнялись с использованием малогабаритного пульсатора-кавитатора ПГД-3Мм.

Можно также добавить, что технология КИВ с использованием пульсатора-кавитатора ПГД-3М была успешно применена на 2-х скважинах Ярактинского нефтегазоконденсатного месторождения Иркутской нефтяной компании (Российская Федерация).

Струйно-импульсное воздействие

Суть данной технологии заключается в формировании импульсного кругового движения скважинной жидкости или химического реагента за счет прокачки ее через ротационный пульсатор. В интервале установки пульсатора (в ПЗП) происходит размыв породы через перфорационные каналы, что приводит к улучшению фильтрационных свойств. Наибольшие импульсы давления возникают при совпадении устьев насадок пульсатора с устьями перфорационных каналов, т. е. затопленная турбулентная струя рабочей жидкости, бьющая в тупик [6].

Разработка технологии струйно-импульсного воздействия (СИВ) на пласт с применением ротационного пульсаторов была выполнена в БелНИПИнефть в сотрудничестве с ГГТУ им. П. О. Сухого в 2018–2019 гг.

На основе модельных исследований максимальные значения крутящего момента на роторе удалось получить в варианте, представленном на рис. 4 [10].

Проведенные опытно-промысловые испытания (ОПН) на ряде месторождений НГДУ «Речицанефть» позволили рекомендовать данную разработку для промышленного внедрения.

Оценка эффективности проводимых геолого-технических мероприятий выполненных работ оценивалась в дополнительной добыче нефти. Так, за 3 года эксплуатации скважин 3 З-Сосновского и 25 Чкаловского месторождений суммарно получено более 11000 т. Данные по эффективности приведены в таблице.

По результатам испытания как на этапе ОПИ, так и при внедрении на объектах описываемая технология зарекомендовала себя как высокоэффективная и низкозатратная, и была рекомендована для внедрения в производство на нефтедобывающих предприятиях Республики Беларусь и при оказании сервисных услуг в других нефтяных регионах.

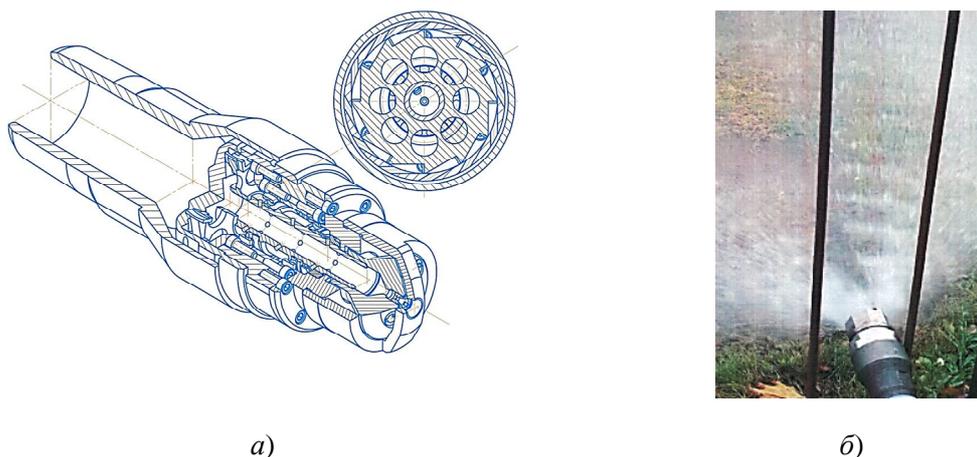


Рис. 4. Ротационный пульсатор:
а – конструкция ротационного пульсатора; б – стендовые испытания

Заключение

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что все рассмотренные технологии гидроимпульсного воздействия разработанного в БелНИПИнефть оборудования показали и свою эффективность, выраженную в полученной дополнительной добыче нефти, и технологичность (используется стандартное нефтепромысловое оборудование). Применение технологий ГИКВ, КИВ и СИВ с использованием пульсаторов типа В1, ПГД-3 и ПР-ТК осуществляется при выполнении геолого-технических мероприятий на месторождениях Республики Беларусь.

Литература

1. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия / В. П. Дыбленко [и др.]. – М. : Недра, 2000. – 382 с.
2. Янтурин, А. Ш. Выбор частот при вибрационном воздействии на призабойную зону пласта / А. Ш. Янтурин, Р. Ш. Рахимкулов, Н. Ф. Кагарманов // Нефтяное хозяйство. – 1986. – № 12. – С. 40–42.
3. Вибратор : пат. 9460 Респ. Беларусь, МПК Е 21 В 43/25, Е 21 В 28/00 / Демяненко Н. А., Родионов В. И., Гавриленко А. И., Лымарь И. В., Абелев Е. М. ; заявитель Респ. унитар. предприятие «Производственное объединение «Белоруснефть». – № 20040432 ; заявл. 30.12.05 ; опубл. 30.06.07.
4. Устройство для очистки призабойной зоны низкопроницаемых коллекторов : пат. 4398 Респ. Беларусь, МПК Е 21 В 43/25 / Демяненко Н. А., Родионов В. И., Гавриленко А. И. ; заявитель Респ. унитар. предприятие «Производственное объединение «Белоруснефть». – № 20070755 ; заявл. 29.10.07 ; опубл. 30.06.08.

5. Омелянюк, М. В. Гидравлические генераторы колебаний в нефтегазовом деле / М. В. Омелянюк // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2011. – № 3. – С. 54–60.
6. Ибрагимов, Л. Х. Интенсификация добычи нефти / Л. Х. Ибрагимов, И. Т. Мищенко, Д. К. Челоянц. – М. : Наука, 2000. – 414 с.
7. Моделирование гидродинамических процессов при кавитационно-импульсной кислотной обработке нефтескважин / Д. В. Ткачëв [и др.] // Современные проблемы машиноведения : тез. докл. X Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 23–24 окт. 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, ОАО «Компания «Сухой» ; под общ. ред. С. И. Тимошина. – Гомель, 2014. – С. 79–80.
8. Устройство для гидродинамической кавитационной обработки скважин : пат. на полезную модель 11968 Респ. Беларусь, МПК Е 21 В 43/25 / Серебренников А. В., Цыбранков А. Н., Ткачëв Д. В., Ткачев В. М., Селютин А. М. ; заявитель Респ. унитар. предприятие «Производственное объединение «Белоруснефть» ; заявл. 12.11.18; опубл. 01.02.19.
9. Устройство для гидродинамической кавитационной обработки скважин : пат. 028724 ЕА, МПК Е 21 В 28/00 / Серебренников А. В., Ткачëв Д. В., Ткачев В. М., Селютин А. М., Столяров А. И. ; заявитель Респ. унитар. предприятие «Производственное объединение «Белоруснефть» ; заявл. 31.08.15 ; опубл. 29.12.17.
10. Ткачëв, Д. В. Опыт конструирования и промышленного применения ротационных пульсаторов на нефтяных месторождениях Республики Беларусь / Д. В. Ткачëв, В. М. Ткачев, А. М. Селютин // Оборудование и технологии для нефтегаз. комплекса. – 2021. – № 5. – С. 69–72.

Referens

1. Dyblenko V. P., Kamalov R. N., Shariffulin R. Ya., Tufanov I. A. *Increase of productivity and reanimation of wells with the use of vibro-wave stimulation*. Moscow, Nedra Publ., 2000. 382 p. (in Russian).
2. Yanturin A. Sh., Rakhimkulov R. Sh., Kagarmenov N. F. Frequency selection during vibration impact on bottomhole formation zone. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*, 1986, no. 12, pp. 40–42 (in Russian).
3. Demyanenko N. A., Rodionov V. I., Gavrilenko A. I., Lyamar' I. V., Abelev E. M. Vibrator. Patent Respublika Belarus', no. 9460, 2007 (in Russian).
4. Demyanenko N. A., Rodionov V. I., Gavrilenko A. I. *Device for bottom-hole cleaning of low-permeability reservoirs*. Patent Respublika Belarus', no. 4398, 2008 (in Russian).
5. Omel'yanyuk M. V. Hydraulic vibration generators in the oil and gas industry. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa = Equipment and technologies for oil and gas complex*, 2011, no. 3, pp. 54–60 (in Russian).
6. Ibragimov L. X., Mishchenko I. T., Cheloyants D. K. *Intensification of oil production*. Moscow, Nauka Publ., 2000. 414 p. (in Russian).
7. Tkachev D. V., Stolyarov A. I., Selyutin A. M., Tkachev V. M. Modelling of hydrodynamic processes during cavitation-pulse acid treatment of oil-producing wells. *Sovremennyye problemy mashinovedeniya: tezisy dokladov X Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (nauchnye chteniya, posvyashchennyye P. O. Suhomu), Gomel', 23–24 okt. 2014 g.* [Modern Problems of Mechanical Engineering: Abs. of X International Scientific and

- Technical Conference (scientific readings dedicated to P. O. Sukhoi), Gomel', October 23–24, 2014]. Gomel, 2014, pp. 79–80 (in Russian).
8. Serebrennikov A. V., Tsybrankov A. N., Tkachev D. V., Tkachev V. M., Selyutin A. M. Device for hydrodynamic cavitation treatment of wells. Patent Respublika Belarus', no. 11968, 2018 (in Russian).
 9. Serebrennikov A. V., Tkachev D. V., Tkachev V. M., Selyutin A. M., Stolyarov A. I. Device for hydrodynamic cavitation treatment of wells. Patent Respublika Belarus', no. 028724, 2017 (in Russian).
 10. Tkachev D. V., Tkachev V. M., Selyutin A. M. Experience of design and industrial application of rotary pulsators at oil fields of the Republic of Belarus. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa = Equipment and technologies for oil and gas complex*, 2021, no. 5, pp. 69–72 (in Russian).

Поступила 12.04.2024