

УДК 622.276

**УНИВЕРСАЛЬНОЕ ЗАБОЙНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ  
СТАЦИОНАРНОЙ ЗАКАЧКИ ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНУ**  
DOWNHOLE UNIVERSAL DEVICE FOR PULSED  
STATIONARY PUMPING OF FLUIDS INTO THE WELL

**М. Я. Хабибуллин, Р. И. Сулейманов, М. Л. Галимуллин, Д. И. Сидоркин**  
M. Ya. Habibullin, R. I. Suleymanov, M. L. Galimullin, D. I. Sidorkin

*Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета,  
г. Октябрьский*

*Ключевые слова: универсальное забойное устройство; импульсная стационарная закачка;  
период свободных колебаний*

*Key words: downhole universal device; pulsed stationary pumping; free-running period*

Устройство для импульсной стационарной закачки жидкости (рис. 1) включает целый корпус 1 с крышкой 2, дном 3 и выпускными каналами 4 и 5 для сообщения полости корпуса, подвижный рабочий орган 6, который образует с корпусом рабочие камеры 7 и 8 и каналы подачи рабочего агента 9 и 10 [1]. Рабочий орган 6 установлен в корпусе 1 на опоре скольжения 11. Опора скольжения выполнена из шпильки 12, установленной в отверстиях корпуса 1 с навинченной гайкой 13. В верхней части корпуса 1, после крышки 2, установлен переводник 14, во внутренней части которого расположено подвижное сопло 15 с опорными поверхностями 16. В крышке 2 имеется впускной канал 17, выполненный в виде радиального отверстия. Выпускной канал 5, выполненный в корпусе 1 и крышке 2, сообщает одну из полостей корпуса с полостью 18 под опорными поверхностями 16 сопла 15. Перед каналами подачи рабочего агента 9 и 10 расположена камера смешения 19, выполненная в крышке 2. В нижней части устройства имеется насадка 20 с радиальными отверстиями 21 одинаковой внутренней площади, причем общая внутренняя площадь отверстий 21 равна внутренней площади выпускного канала 4.

Работа устройства для закачки жидкости осуществляется следующим образом. Устройство на конце колонны насосно-компрессорных труб, ниже пакера, опускают на забой нагнетательной скважины, жидкость с устья скважины через колонну труб и пакер, переводник 14, сопло 15, камеру смешения 19, каналы 9 и 10 поступает, соответственно, в рабочие камеры 7 и 8 корпуса 1. Благодаря выпускному каналу 5, соединяющему камеру 8 с полостью 18 под опорными поверхностями 16 сопла 15, перепад давления жидкости на рабочий орган 6 со стороны камеры 7 будет больше. Под действием большего перепада давления рабочий орган 6 перемещается в сторону камеры 8 и открывается канал 4, импульс жидкости через радиальные отверстия 21 насадки 20 подается на призабойную зону нагнетательной скважины. Перепад давления в камере 7 падает и становится меньше, чем в камере 8. В следующий момент рабочий орган 6 отклоняется в сторону камеры 7 и полностью закрывает отверстие канала 4. В обеих камерах 7 и 8 повышается давление. Далее рабочий орган 6 продолжает отклоняться в сторону камеры 7, причем его скорость движения зависит от объема нагнетаемой жидкости. Затем открывается канал 4, и в призабойную зону скважины поступает импульс давления. Давление в камере 8 падает, а в камере 7 возрастает. Рабочий орган 6 перемещается в направлении камеры 8. Циклы повторяются. Контактное взаимодействие рабочего органа 6 с корпусом 1 не происходит, вследствие того что внутренняя площадь канала 4 отличается в большую сторону от внутренних площадей отверстий 9 и 10. Такое конструктивное решение позволяет ограничить движение рабочего органа внутри корпуса (тем самым не происходит ударов рабочего органа о стенки корпуса). Выпускной канал 5 обеспечивает первоначальную сдвигу рабочего органа 6.

При уменьшении приемистости нагнетательной скважины в рабочих камерах 7 и 8 резко возрастает давление, которое через канал 5 передается опорным поверхностям 16 сопла 15. Последнее начинает перемещаться вверх, открывая впускной канал 17. За счет эффекта инжекции увеличивается расход подаваемой жидкости с призабойной зоны скважины в камеру смешения 18 и каналы 9 и 10. Скорость перемещения рабочего органа 6 прямо пропорционально зависит от расхода жидкости (увеличивается при увеличении). С увеличением скорости движения рабочего органа 6 увеличивается количество импульсов жидкости на выходе из устройства, что, в свою очередь, улучшает очистку призабойной зоны скважины. При восстановлении приемистости нагнетательной скважины сопло 15 перемещается вниз, занимая исходное положение, и расход подаваемой жидкости к каналам 9 и 10 уменьшается. Это приводит к уменьшению частоты создаваемых импульсов в жидкости и дальности распространения колебаний [2, 3].

В процессе длительной закачки при низких частотах колебания жидкости происходят засорение призабойной зоны нагнетательной скважины и уменьшение ее приемистости. Для создания более высоких частот колебания жидкости, что ускоряет процессы самоочистки призабойной зоны, необходимо увеличивать расход жидкости в импульсном устройстве (прямо пропорциональная зависимость). Использование в верхней части корпуса подвижного сопла с опорными поверхностями и впускным каналом позволяет увеличивать расход жидкости в импульсном устройстве при уменьшении приемистости нагнетательной скважины, увеличивая частоту колебаний жидкости на выходе из устройства в среднем в 2,5–3,5 раза (по результатам лабораторных исследований) [4–7]. Применение этого устройства позволяет увеличивать функциональную универсальность его работы. Опытное применение данного устройства было проведено на месторождениях АО «Башнефть» в 2015–2016 гг., что позволяло достигать постоянной приемистости нагнетательной скважины в течение 1,0–1,2 года и значительного прироста добычи нефти в эксплуатационных скважинах.

Для описания закона перемещения рабочего органа сопоставим устройство с математическим аналогом в виде физического маятника (математическая модель изображена на рисунке 2) с вязким демпфированием [8]. С учетом того, что балансир перемещается в корпусе под действием давления, срабатываемого в устройстве, с обеих полостей, можно записать уравнение [8, 9]

$$I = \varphi + (mgl + \Delta PSI) \sin \varphi = 0. \quad (1)$$

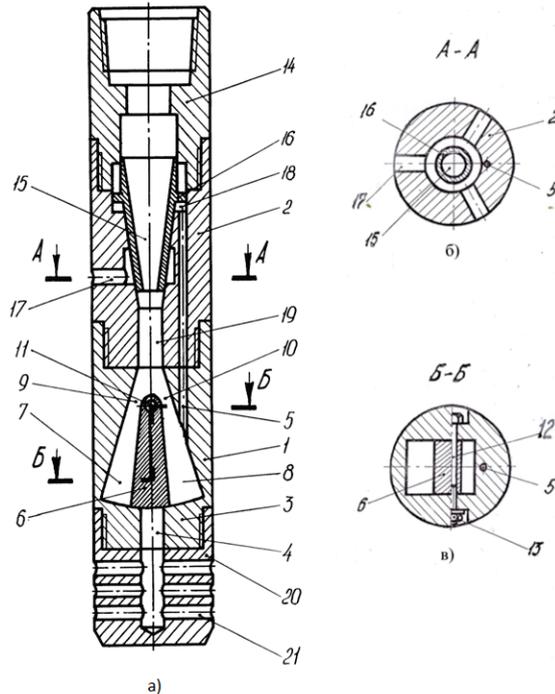


Рис. 1. Устройство для импульсной закачки жидкости: а) схема сечения устройства; б) сечение А-А; в) сечение Б-Б

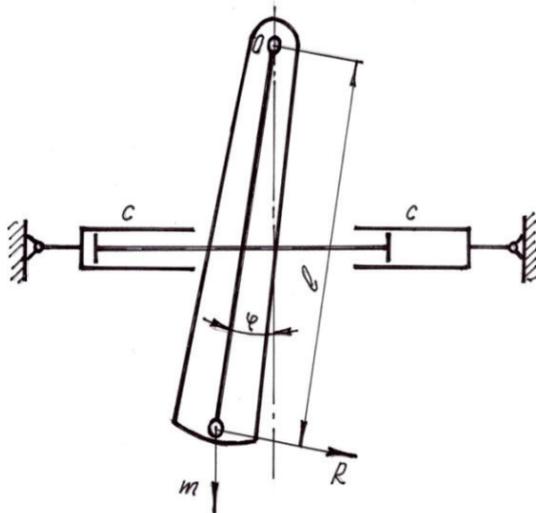


Рис. 2. Схема расположения рабочих элементов в устройстве

Так как момент инерции балансира можно определить как  $I = ml^2$ , то уравнение (1) можно записать

$$I = ml^2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \left( \frac{q}{l} + \frac{\Delta PS}{ml} \right) \sin\varphi = 0, \quad (2)$$

где  $\Delta P$  — перепад давления в устройстве, МПа;  $S$  — площадь боковой части рабочего органа, мм<sup>2</sup>;  $m$  — сосредоточенное усилие от массы рабочего органа, Н.

В дальнейшем после упрощения получаем

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + p^2 \sin\varphi = 0, \quad (3)$$

где  $p^2 = \frac{q}{l} + \frac{\Delta PS}{ml}$ .

В качестве допущения можно принять, что восстанавливающий момент рабочего органа при незначительных углах его отклонения до 15° будет пропорционален  $\sin$  угла поворота  $\varphi$ .

Математическое решение этой задачи предполагает применение разложения функции  $\sin\varphi$  в степенной ряд. В дальнейшем, применяя приближенный метод усреднения Ритца и задачу о свободных колебаниях, решение данной задачи завершается интегрированием и применением эллиптического интеграла первого рода. В итоге, исходя из формулы периода свободных колебаний, получаем выражение для определения частоты колебания

$$\omega = \frac{p\sqrt{2-\nu}}{\sqrt{32F} \left( \sqrt{\frac{\nu}{2-\nu}}, \frac{\pi}{2} \right)}. \quad (4)$$

Амплитуда изменения давления жидкости, получаемая на выходе из устройства, будет характеризоваться тремя участками.

На каждом участке при открытии выпускного канала 4 амплитуда изменения давления будет изменяться и определяться

$$P(t) = P_1 + \tilde{Q}^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{F_1^2 \cdot 2 \cdot \xi^2}, \quad (5)$$

где  $P_1$  — противодействие в скважине, МПа;  $d_2$  — внутренний диаметр выпускного канала, мм;  $\tilde{Q}$  — расход жидкости в устройстве, м<sup>3</sup>/с;

$$\tilde{Q} = \frac{Q}{2} \left( 1 + \frac{\varphi}{\varphi_M} \right), \quad (6)$$

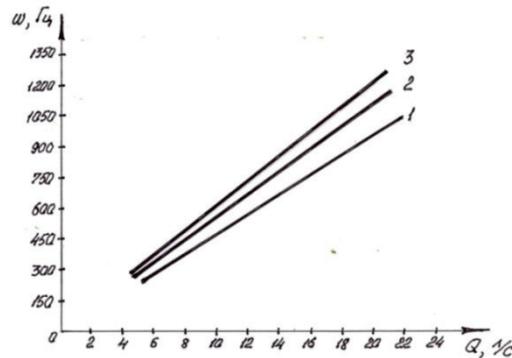
$\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $F_1$  — площадь поперечного сечения выпускного отверстия 4 (определяется путем применения полярных координат), м<sup>2</sup>;

$$F_1 = \frac{d_2^2}{2} \left[ \frac{\pi}{4} \left( 1 + \frac{\varphi}{\varphi_M} \right) + \frac{1}{4} \sin \frac{\varphi}{\varphi_M} 180^\circ \right], \quad (7)$$

$\xi$  — коэффициент истечения жидкости из отверстий;  $Q$  — общий объем закачиваемой жидкости в скважину, м<sup>3</sup>/с;  $\varphi$  — текущий угол поворота рабочего органа, град.;  $\varphi_M$  — максимальный угол поворота рабочего органа, град.

На рисунке 3 представлены графические зависимости частоты колебаний рабочего органа от его длины и расхода жидкости, полученные по выражению (4). Для полноты лабораторных экспериментов были выбраны три значения длины рабочего органа — 80, 120, 160 мм. После анализа полученных стендовых результатов выявлено, что при длине балансира  $l = 80$  мм и расходе жидкости 15–20 л/с создается диапазон частот колебания жидкости на выходе из устройства 600–900 Гц [10–12]. Приведенный диапазон является наиболее эффективным с учетом результатов, полученных в работах [13, 14].

*Рис. 3. Графические зависимости частоты колебаний рабочего органа от его длины и расхода закачиваемой жидкости:  
1 —  $l = 80$  мм;  
2 —  $l = 120$  мм;  
3 —  $l = 160$  мм*



Полученные результаты стендовых испытаний скважинного устройства при расходе жидкости  $Q = 15$  л/с и длины рабочего органа  $l = 80, 120$  и  $160$  мм представлены на рисунке 4 (погрешность полученных результатов при сравнении с теоретическими  $\pm 5,8$  %). В результате анализа стендовых испытаний было выявлено, что при изменении длины рабочего органа амплитуда давления жидкости на выходе изменялась незначительно. Изменение было выявлено при изменении расхода закачиваемой жидкости (при увеличении последнего амплитуда увеличивается). Причем при сопоставлении полученных результатов учитывались погрешности измерений.

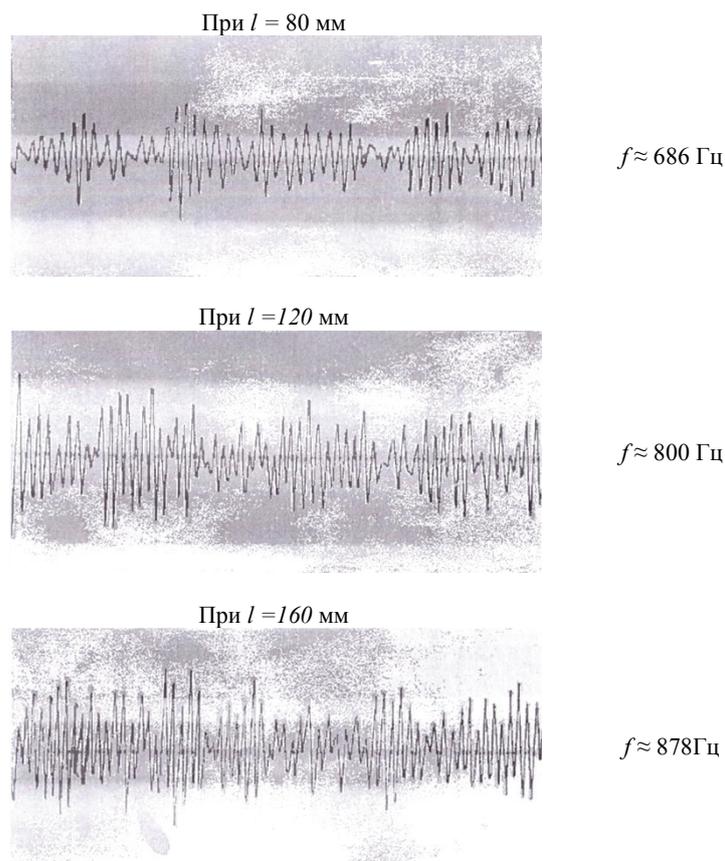


Рис. 4. Результаты стендовых испытаний скважинного устройства при  $Q = 15$  л/с (масштаб горизонтальный 10 см — 0,14 с)

Таким образом, применение данного устройства позволяет вести непрерывную закачку жидкости импульсами в нагнетательную скважину, повышая длительную эффективную стационарную закачку за счет увеличения функциональной универсальности его работы, увеличивая проницаемость пласта, повышая скорость проникновения жидкости в замкнутые поры нефтяного коллектора и выталкивая пластовую жидкость из пор.

**Библиографический список**

1. Патент на изобретение RUS 2241825 13.02.2003 Устройство для закачки жидкости / Гилаев Г. Г., Тухтеев Р. М., Хабибуллин М. Я., Ибраев Р. А.; заявл. 13.02.03; опубл. 10.12.04.
2. Хабибуллин М. Я., Арсланов И. Г., Абдюкова Р. Я. Оптимизация процесса вытеснения нефти при стационарной импульсной закачке воды // Нефтепромысловое дело. – 2014. – № 3. – С. 24–28.
3. Хабибуллин М. Я., Сулейманов Р. И., Давыдов А. Ю. Теоретические и лабораторные исследования работы устройства для импульсной закачки жидкости в скважину // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 3. – С. 16–21.
4. Хабибуллин М. Я., Арсланов И. Г., Абдюкова Р. Я. Лабораторная установка по исследованию процессов при импульсной закачке жидкостей в пласт // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 2. – С. 14–16.
5. Хабибуллин М. Я., Сулейманов Р. И., Сидоркин Д. И. Лабораторно-теоретические исследования работы двухбалансирной конструкции устройства для импульсной закачки жидкости в скважину // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. – № 5. – С. 109–113.
6. 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.
7. Хабибуллин М. Я., Арсланов И. Г. Параметры неустановившегося движения закачиваемой жидкости в колонне насосно-компрессорных труб при работе импульсных устройств // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 1. – С. 148–165.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 833 с.

9. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Расчеты в теоретической и прикладной механике. – Уфа, 2016.
10. Желтов Ю. Н. Механика нефтегазоносного пласта. – М.: Недра, 1975. – 216 с.
11. Кузнецов О. Л., Ефимова С. А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1983. – 192 с.
12. Янтурин А. Ш., Рахимкулов Р. Ш., Кагарманов Н. Ф. Выбор частот при вибрационном воздействии на призабойную зону пласта // Нефтяное хозяйство. – 1986. – № 12. – С. 40–42.
13. Патент на изобретение RUS 2198288 12.10.1999. Способ закачки жидкости в нагнетательные скважины и устройство для его осуществления // Султанов Б. З., Тухтеев Р. М., Хабибуллин М. Я., Туйгунов М. Р.; заявл. 12.10.99; опубл. 10.02.03.
14. Хабибуллин М. Я., Шангареев Р. Р. Исследование процессов влияния давления и частоты импульсов на проницаемость жидкости в песчаных образцах // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. – № 4. – С. 120–125.

**Сведения об авторах**

**Хабибуллин Марат Яхиевич**, к. т. н., доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. 89177414994, e-mail: m-hab@mail.ru

**Сулейманов Рустэм Исхакович**, к. т. н., доцент, заведующий кафедрой нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. 8(34767)65401, e-mail: rustamsul@rambler.ru

**Галимуллин Миниварис Лутфуллинович**, к. т. н., доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский

**Сидоркин Дмитрий Иванович**, к. т. н., доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский

**Information about the authors**

**Habibullin M. Ya.**, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technical University, phone: 89177414994, e-mail: m-hab@mail.ru

**Suleymanov R. I.**, Candidate of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technical University, phone: 8(34767)65401, e-mail: rustamsul@rambler.ru

**Galimullin M. L.**, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technological University

**Sidorkin D. I.**, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technological University

УДК 622.323

**ИННОВАЦИИ И РЕНОВАЦИИ СПОСОБА УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ АКУСТИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ**

**INNOVATIONS AND RENOVATIONS OF ENHANCED OIL RECOVERY BY ACOUSTIC FIELDS**

**Н. В. Шаталова**

N. V. Shatalova

*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

*Ключевые слова: методы увеличения нефтеотдачи; акустический преобразователь; коагуляция; стоячие волны*

*Key words: enhanced oil recovery methods; acoustic transducer; coagulation; standing waves*

**Введение**

Текущее состояние сырьевой базы нефтяной промышленности характеризуется тем, что большая часть ее ресурсов сосредоточена в продуктивных объектах поздней стадии эксплуатации, когда запасы углеводородов переходят в разряд трудно-извлекаемых. Тенденция осложнения процессов разработки охватила большинство месторождений Западной Сибири — Самотлорское, Комсомольское, Приобское, Тарасовское, Барсуковское, Западно-Пурпейское, Южно-Харампурское, Хохряковское, Южно-Охтеурское [1]. Массовое применение гидроразрыва пласта (ГРП) усугубило проблему нефтедобычи: эффект увеличения нефтеотдачи сопровождается быстрым ростом обводненности месторождений и загрязнением призабойных зон скважин кольматантом сложного состава, что приводит к нивелированию результата от реализации гидроразрыва.