УДК 622.076.053

ЛАБОРАТОРНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ДВУХБАЛАНСИРНОЙ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЗАКАЧКИ ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНУ

LABORATORY-AND-THEORETICAL STUDIES OF OPERATION OF TWO-EQUALIZER DESIGN OF THE DEVICE FOR PULSED INJECTION OF LIQUID INTO THE WELL

М. Я. Хабибуллин, Р. И. Сулейманов, Д. И. Сидоркин
M. Ya. Habibullin, R. I. Suleymanov, D. I. Sidorkin

Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский

Ключевые слова: двухбалансирный вибратор; геофизические приборы; призабойноая зона, квадратное уравнение; расход жидкости; испытания
Key words: two-equalizer vibrator; geophysical instruments; bottomhole zone treatment; quadratic equation; flow rate; fluids; tests

Следующим представителем конструкции балансирного типа, разработанного в Октябрьском филиале Уфимского государственного нефтяного технического университета, является устройство для воздействия на призабойную зону скважины [1, 2, 3]. При разработке рассматриваемого скважинного гидравлического вибратора мы исходили из условий необходимости обеспечения свободного доступа геофизических приборов к забою скважины после каждого цикла обработки призабойной зоны без подъема вибратора на устье скважины. Устройство, представленное на рисунке 1, состоит из корпуса 1, установленного в нем направляющего патрубка 2, днища 3 и переводника 4 для соединения устройства колонны НКТ.

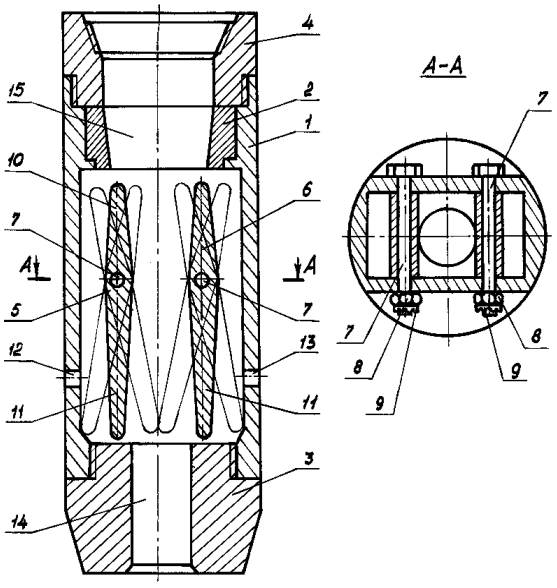


Рис. 1. ***Устройство для воздействия на призабойную зону скважины***

В корпусе 1 между направляющим патрубком 2 и днищем 3 размещен рабочий орган, выполненный в виде равноудаленных от центральной оси корпуса двух балансиров 5 и 6, которые установлены на опорах скольжения 7.

Последние закреплены в корпусе 1 с помощью гаек 8 и шплинтов 9. Балансиры 5 и 6 имеют меньшие верхние 10 и большие нижние 11 плечи и выполнены в поперечном сечении в форме ромба. В нижней части корпуса 1 расположены на одном уровне левый 12 и правый 13 радиальные каналы. Площадь поперечного сечения канала 14 днища 3 выполнена меньше площади отверстия 15 в патрубке 2. При работе устройства жидкость с устья скважины через колонну НКТ и переводник 4 поступает в направляющий патрубок 2 и далее в корпус 1. За счет того, что диаметр канала 14 днища 3 меньше диаметра отверстия 15 направляющего патрубка 2 в корпусе создается перепад давления, величина которого определяется по формуле

$$\Delta P = \left(\frac{Q^2}{F_3^2} - \frac{Q^2}{F_2^2} \right) \frac{\rho}{2\phi^2}, \qquad (1)$$

где Q — расход жидкости, м^3/с; ρ — плотность жидкости, кг/м^3; F_3 и F_2 — соответственно площади поперечного сечения канала 14 днища 3 и наименьшего диаметра отверстия 15 направляющего патрубка, м^2; φ — коэффициент истечения жидкости из отверстия днища 3.

В результате действия перепада давления нижние плечи 11 балансиров 5 и 6 (как большие) перемещаются к периферии внутренней поверхности корпуса 1. Это перемещение дополнительно стимулируется наличием радиальных каналов 12 и 13 в корпусе 1. При отклонении балансиров от положения равновесия верхние плечи 10 частично перекрывают нагнетаемый поток жидкости в корпус 1, и некоторая ее часть поступает в полости между балансирами 5 и 6 и боковыми внутренними поверхностями корпуса 1. Площадь условного сечения между верхними концами балансиров 5 и 6 при таком их положении равна площади сечения канала днища 3, и величина перепада давления, действующая между балансиром и боковой поверхностью корпуса 1, определяется (для одного балансира) по формуле

$$\Delta P_b = \left[\frac{Q^2}{(F_4 + f)^2} - \frac{Q^2}{F_2^2} \right] \cdot \frac{\rho}{2\phi^2} , \qquad (2)$$

где F_4 — площадь проходного сечения между верхними концами балансиров при периферийном расположении их нижних концов, м^2; f — площадь поперечного сечения радиального канала 12 или 13 корпуса, м^2.

За счет разности длин плеч балансиров их нижние концы перемещаются к центральной оси корпуса 1. В следующий момент времени происходит перекрытие потока жидкости, и нижние концы балансиров 5 и 6 начинают перемещаться к периферии. В результате такой работы балансиров как из канала 14 днища 3, так и из радиальных каналов 12 и 13 происходит истечение импульсов жидкости с амплитудой колебания давления, причем значение последней в радиальных каналах несколько выше, чем в канале 14 днища 3. При прекращении закачки жидкости в пласт балансиры устанавливаются в вертикальное равновесное положение, и, тем самым, обеспечивается свободный проход измерительных геофизических приборов к забою скважины.

При определении основных параметров работы устройства будем рассматривать, во-первых, синхронное перемещение балансиров в противоположные направления, во-вторых, два периода движения балансира: 1 — от крайнего левого положения до положения равновесия; 2 — от положения равновесия до крайнего правого положения нижнего плеча балансира (для левого балансира 5, а для правого 6 — наоборот), в-третьих, только один балансир, поскольку второй не влияет на величину частоты колебания жидкости (что нам требуется определить), а только усиливает значение амплитуды колебания давления жидкости на выходе из вибратора ровно в 2 раза.

Перемещение в правом периоде (для левого балансира) будет осуществляться подобно физическому маятнику. В таком случае период колебания определяется [4–8] как

$$t_1 = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{I}{D}} , \qquad (3)$$

где I — момент инерции балансира относительно своей оси, Нм^2;

$$I = \left(\frac{m}{12} l^2 + mS^2 \right) q, \qquad (4)$$

где m — масса балансира, кг; l — длина балансира, м; S — расстояние между осью и центром тяжести балансира, м; D — угловая жесткость, Нм;

$$D = \frac{\Delta P_b (f_1 - f_2) \cdot S \cdot \sin\alpha}{\alpha} , \qquad (5)$$

где ΔP_b — величина перепада давления, определяемая по выражению (2), Па; f_1 и f_2 — соответственно площади нижнего и верхнего плеча балансира, м^2; α — угол поворота балансира, рад.

На основании вышеприведенных выражений, после соответствующих преобразований получаем

$$t_1 = \pi\phi \sqrt{\frac{\alpha m\left(l^2 + 12S^2\right)}{6S\rho \sin\alpha \left[\frac{Q^2}{\left(F_4 + f\right)^2} - \frac{Q^2}{F_2^2}\right]\left(f_1 - f_2\right)}} \quad . \tag{6}$$

Для второго периода перемещения балансира от положения равновесия до крайнего правого положения время, за которое он пройдет это перемещение, будет определяться исходя из равенства сил (исключаем возможность взаимодействия левого балансира с правым при конструировании гидравлического вибратора)

$$F_U = R\,, \tag{7}$$

где F_U — сила инерции движения балансира, Н,

$$F_U = m \cdot a; \tag{8}$$

R — противодействующая нагрузка, создаваемая перепадом давления, Н,

$$R = \Delta P_b \left(f_1 - f_2\right) \cdot \tag{9}$$

Используем закон сохранения энергии для положения равновесия балансира и после некоторых преобразований получаем следующее квадратное уравнение:

$$\frac{\Delta P_b \left(f_1 - f_2\right)}{2m} t_2^2 - \sqrt{\frac{2\Delta P \left(f_1 - f_2\right) S}{m}} t_2 + \left(l - r\right)\alpha = 0\,, \tag{10}$$

где ΔP — перепад давления, срабатываемый в вибраторе и определяемый по выражению (1), Па; r — длина верхнего плеча балансира, м.

Действительный корень уравнения (10) после некоторых преобразований, будет иметь вид

$$t_2 = \frac{\sqrt{2m}\left[\sqrt{\Delta PS} + \sqrt{\Delta PS - \Delta P_b\left(l - r\right)}\right]}{\Delta P_b \sqrt{f_1 - f_2}}\,. \tag{11}$$

Тогда частота колебаний балансира после сложения выражений (6) и (11) и упрощения будет определяться как

$$\omega = \frac{\Delta P_b \sqrt{f_1 - f_2}}{\pi \sqrt{\frac{\alpha m\left(l^2 + 12S^2\right)\Delta P_b}{48S \sin\alpha}} + \sqrt{2m}\left[\sqrt{\Delta PS} + \sqrt{\Delta PS - \Delta P_b\left(l - r\right)\alpha}\right]}\,. \tag{12}$$

На основании полученного выражения (12) была разработана опытная конструкция. На рис. 2 представлены графические зависимости частоты колебания балансиров с учетом изменения длины верхних плеч балансиров. В работе [9] приведена подробная методика проведения лабораторных исследований с опытными конструкциями вибраторов. Следует отметить, что стендовые испытания произведены со следующими конструкциями: двухбалансирное устройство, представленное на рис. 1, и скважинный вибратор, схема которого приведена в работе [9].

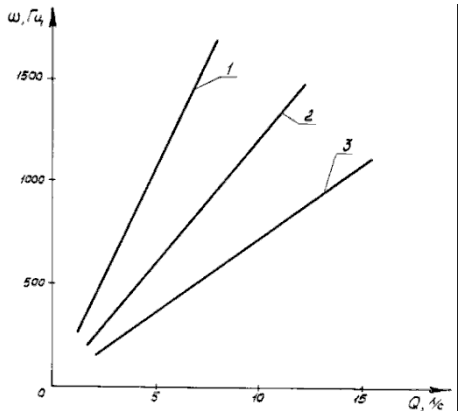
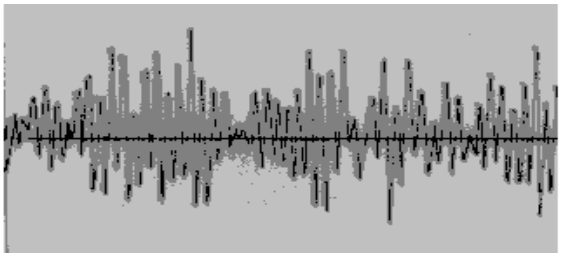


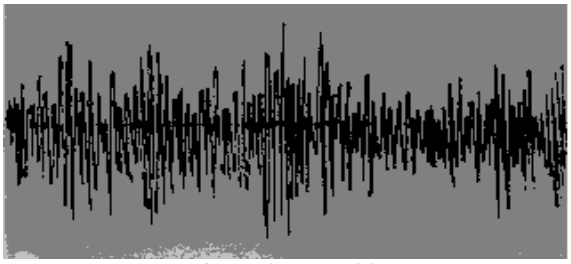
Рис. 2. ***Зависимость частоты колебания жидкости от расхода при различных значениях длины верхнего плеча балансиров: 1 — r = 60 мм; 2 — r = 80 мм; 3 — r = 100 мм***

Испытания двухбалансирной конструкции проводились при постоянном значении расхода жидкости Q = 5 л/с для следующих значений длины верхнего плеча балансиров r = 60, 100 мм и при Q = 10 л/с и r = 80 мм. Полученные результаты были сняты на фотобумагу и представлены на рис. 3.



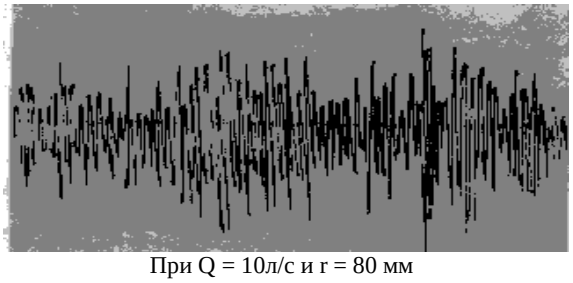
$f \approx 420$ Гц

При Q = 5л/с и r = 60 мм



$f \approx 1210$ Гц

При Q = 5л/с и r = 100 мм



$f \approx 1380$ Гц

При Q = 10л/с и r = 80 мм

Рис. 3. ***Результаты стендовых испытаний двухбалансирной конструкции вибратора (давление в затрубном пространстве 0,6 МПа, давление на входе в вибратор — 1,1 МПа)***

При анализе фотоснимков можно выявить, что с увеличением расхода жидкостей и уменьшением размера верхнего плеча балансиров увеличивается частота создаваемых колебаний. При сравнении теоретических зависимостей, представленных на рис. 2, с полученными лабораторными результатами относительная погрешность составила +16 %. Наиболее оптимальной конструкцией, мы считаем, будет вибратор с размерами верхних плеч балансиров r = 100 мм при расходе рабочей жидкости 10–15 л/с [10, 11].

Список литературы

1. Султанов Б. З., Тухтеев Р. М., Хабибуллин М. Я. Способ закачки жидкости в нагнетательные скважины и устройство для его осуществления / Патент на изобретение RUS 2198288 12.10.1999.
2. Гилаев Г. Г., Тухтеев Р. М., Хабибуллин М. Я. Устройство для закачки жидкости / Патент на изобретение RUS 2241825 13.02.2003.
3. Хабибуллин М. Я. Разработка вибротехники для эффективной закачки жидкости в нефтяной пласт: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Уфа, 1999.
4. Хабибуллин М. Я., Арсланов И. Г. Расчет нефтепромыслового оборудования. – Уфа: РИЦ УГНТУ, 2014. – 98 с.
5. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Информационные технологии в расчетах нефтепромыслового оборудования // Научное обозрение. – 2015. – № 6. – С. 74-83.
6. Антониади Д. Г., Гилаев Г. Г., Хабибуллин М. Я., Тухтеев Р. М. Добыча нефти. Наземное и подземное оборудование. – Краснодар: Сов. Кубань, 2003. – 320 с.

7. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Расчёты при проектировании деталей и узлов машин – Уфа: РИЦ УГНТУ, 2014. – 126 с.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 833 с.
9. 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: науч.-техн. журн. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», – 2016. – № 2. – С. 14-16.
10. Хабибуллин М. Я. Экспериментально-теоретические исследования вытеснения нефти водой с циклически изменяющейся амплитудой давления // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 6. – С. 233-241.
11. Хабибуллин М. Я., Арсланов И. Г., Абдюкова Р. Я. Оптимизация процесса вытеснения нефти при стационарной импульсной закачке воды // Нефтепромысловое дело: науч.-техн. журн. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2014. – № 3. – С. 24-28.

Сведения об авторах

Хабибуллин Марат Яхиевич, *к. т. н., доцент кафедры «Нефтепромысловые машины и оборудование», Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал), г. Октябрьский, тел. 89177414994, e-mail: m-hab@mail.ru*

Сулейманов Рустэм Исхакович, *к. т. н., доцент кафедры «Нефтепромысловые машины и оборудование», Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал), г. Октябрьский, e-mail: rustamsul@rambler.ru*

Сидоркин Дмитрий Иванович, *к. т. н., доцент кафедры «Нефтепромысловые машины и оборудование», Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал), г. Октябрьский, e-mail: dmsidorkin@mail.ru*

Information about the authors

Habibullin M. Ya., *Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Oilfield machines and equipment», Ufa State Petroleum Technical University, (affiliate), the town of Oktyabrski, phone: 89177414994, e-mail: m-hab@mail.ru*

Suleimanov R. I., *Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Oilfield machines and equipment», Ufa State Petroleum Technical University (Oktyabrski affiliate), e-mail: rustamsul@rambler.ru*

Sidorkin D. I.*, Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Oilfield machines and equipment», Ufa State Petroleum Technical University (Oktyabrski affiliate), e-mail: dmsidorkin@mail.ru*