

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОЛОННЫ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ ПРИ РАБОТЕ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ

М. Я. Хабибуллин, Р. И. Сулейманов, Д. И. Сидоркин, Л. З. Зайнагалина

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

Аннотация. При обработке призабойной зоны рабочая жидкость подается на забой, как известно, неравномерно, вследствие того, что агрегаты снабжены поршневыми насосами. Как правило, изменяющаяся амплитуда давления жидкости срабатывает в забойном импульсном устройстве, в результате чего в колонне насосно-компрессорных труб (НКТ) создаются продольные колебания. По мере распространения колебаний жидкости амплитуда их уменьшается. Для данных условий это связано с диссипативными процессами, называемыми вязкостью и теплопроводностью среды, влиянием стенок, а также рассеянием на неоднородностях. Получены выражения для определения вынужденных динамических перемещений и растягивающих напряжений в каждом сечении колонны НКТ, по которым построены графические зависимости. В результате анализа приведенных кривых было установлено, что применение забойных импульсных устройств с большей площадью сопротивления потоку жидкостной струи уменьшает надежность колонны НКТ, причем это зависит прямо пропорционально как от конструктивных особенностей устройства, так и от расхода нагнетаемой жидкости в пласт. Также выявлено, что надежность колонны НКТ повышается в 1,8 раза при использовании пакера для оборудования забоя обрабатываемой скважины.

Ключевые слова: забойное импульсное устройство; колонна насосно-компрессорных труб; колебания; пакер; насос

STRESS STATE COLUMNS OF TUBING STRING DURING OPERATION PULSED DOWNHOLE DEVICE

M. Ya. Khabibullin, R. I. Suleymanov, D. I. Sidorkin, L. Z. Zainagalina

*Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technological University,
Oktyabrsky, Russia*

Abstract. When treating the bottomhole zone, the working fluid is supplied to the bottom unevenly due to the fact that the units are equipped with piston pumps. The changing amplitude of the liquid pressure is triggered in the pulsed downhole device. As a result, longitudinal oscillations are created in the tubing string. As the oscillations of the liquid propagate, their amplitude decreases. For these conditions, this is due to dissipative processes, which are called viscosity and thermal conductivity of the medium, the influence of the walls, and also scattering by inhomogeneities. We obtained expressions for determining the forced dynamic displacements and tensile stresses in each section of the tubing string, on which graphical dependences are plotted. As a result of the analysis of these curves, it was found that the usage of pulsed downhole device with a larger area of resistance to the flow of a liquid jet reduces the reliability of the tubing string, and it depends directly on both the design features of the device and the flow rate of fluid pumped into the formation. We also revealed that the reliability of the tubing

string is increased by 1,8 times when using a packer for the equipment of the bottomhole of the treated well.

Key words: pulsed downhole device; tubing string; oscillations; packer; pump

В основу импульсного воздействия входит использование упругой волны, излучаемой на устье или непосредственно на забое скважины, для возмущения состояния среды в течение определенного времени (перемещения частиц среды в волне). Величина амплитуды смещения и колебательная скорость частиц среды зависят от амплитуды и интенсивности источника возмущения [1–9]. У данного эффективного и универсального метода воздействия возникает необходимость в повышении надежности применяемого скважинного оборудования. При импульсной закачке жидкостей в скважину в колонне насосно-компрессорных труб (НКТ) создаются гидравлические удары с частотой равной частоте закачиваемой жидкости, вследствие перекрытия проходного отверстия рабочими органами забойных устройств.

Изучение процесса поведения колонны НКТ вызывает значительный интерес с точки зрения ее надежности. Изменение давления рабочей жидкости на выходе из забойных импульсных устройств оказывает влияние на движущийся по колонне НКТ поток, выявляемое вследствие создания гидравлических ударов на входе в вибратор. Циклическое изменение параметров движущегося потока рабочей жидкости создает определенные нагрузки на колонну НКТ. Результаты исследований приведенного влияния представлены в работах [10–12].

Мы предлагаем рассмотреть данный вопрос, не используя громоздкие математические исследования. При обработке призабойной зоны рабочая жидкость подается на забой, как известно, неравномерно, вследствие того, что агрегаты снабжены поршневыми насосами. Как правило, изменяющаяся амплитуда давления жидкости срабатывает в забойном импульсном устройстве, в результате чего в колонне НКТ создаются продольные колебания. Вынужденные динамические перемещения при колебаниях можно представить в виде следующего ряда [13]:

$$U = \varphi_1 \sin \frac{\pi x}{2l} + \varphi_3 \sin \frac{3\pi x}{2l} + \dots = \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \varphi_i \sin \frac{i\pi x}{2l}, \quad (1)$$

где $\varphi_1, \varphi_3, \varphi_5, \dots$ — некоторые неизвестные функции времени; x — произвольная точка на длине колонны НКТ, взятая от свободного конца, м; l — длина колонны НКТ с учетом удлинения от собственного веса и веса столба жидкости, м.

Применяя принцип возможной работы, мы получили выражение для полной возможной работы, приравненное к нулю [14],

$$\frac{d^2 \varphi_i}{dt^2} + P_i^2 \frac{d\varphi_i}{dt} = \frac{2}{\rho S l} R(-1)^{(i-1)/2}, \quad (2)$$

где $P_i = \frac{i\pi d}{2l}$; $i = 1, 3, 5, \dots$; ρ — плотность материала труб, кг/м³; S — площадь поперечного сечения труб, м²; R — возмущающая сила, Н; a — скорость распространения звука в трубах, м/с.

Полученное выражение (2) представляет собой уравнение установившихся вынужденных колебаний при условии, что возмущающая сила R является функцией от времени.

Для одноцилиндрового насоса одностороннего действия изменение амплитуды давления, графическая зависимость которого представлена на рисунке 1 (график 1), на выходе можно представить в виде ряда Фурье [14]

$$P(t) = \frac{P_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cdot \cos \omega t + b_i \cdot \sin \omega t). \quad (3)$$

После определения коэффициентов ряда получаем

$$P(t) = \frac{P_0}{2} + \frac{P_0}{\pi} \left(\sin \omega t - \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} - \dots \right), \quad (4)$$

где P_0 — амплитуда изменения давления, МПа; ω — частота вращения кривошипного вала насоса, c^{-1} .

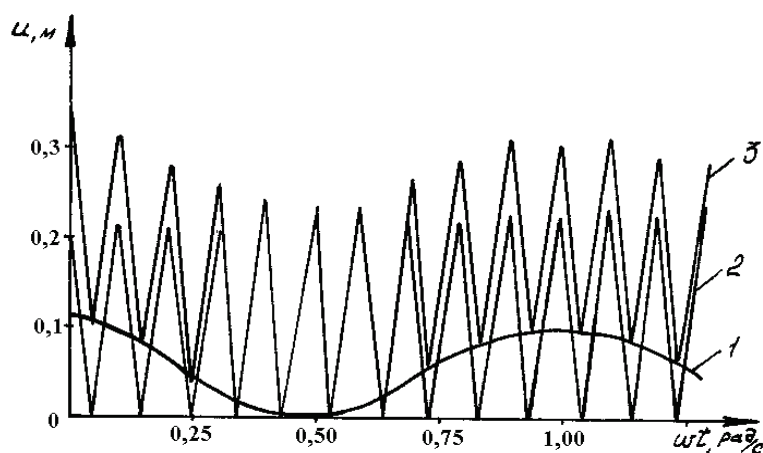


Рис. 1. Перемещение нижнего конца колонны НКТ:

- 1 — при работе насоса с элементарным сопротивлением на конце колонны НКТ;
- 2 — при установке забойного импульсного устройства (частота колебаний закачиваемой жидкости в пласт — 100 Гц) без учета неравномерности работы насоса;
- 3 — при установке забойного импульсного устройства (частота колебаний закачиваемой жидкости в пласт — 100 Гц) с учетом неравномерности работы насоса

Нетрудно заметить, что возмущающую силу в дальнейшем мы рассматриваем в критическом положении при отказе из работы пневмокомпенсаторов насоса. Выражение (4) можно представить для различных конструкций насосов.

По мере распространения колебаний жидкости амплитуда их уменьшается. Для данных условий это связано с диссипативными процессами, называемыми вязкостью и теплопроводностью среды, влиянием стенок, а также рассеянием на неоднородностях. Из работы [2] имеем следующую зависимость:

$$(P)_x = P(t) \cdot e^{-\alpha x}, \quad (5)$$

где α — коэффициент поглощения, определяемый из работы [2].

Решая уравнение (3) с учетом представлений (4) и (5), мы получили выражение для определения неизвестных функций времени [15, 16]

$$\varphi_i = \frac{2(-1)^{(i-1)/2} \cdot R_v \cdot e^{-\alpha x}}{\rho S l (P_i^2 - \omega^2)} \left(\frac{P_0}{2} + \frac{P_0}{\pi} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(i-1)/2}}{i} \sin i \omega t \right), \quad (6)$$

где R_v — площадь импульсного устройства, на которую действует амплитуда изменения давления, м².

Подставляя эти функции в первоначальный ряд (1), находим искомые динамические перемещения произвольно выбранной точки при вынужденных колебаниях колонны НКТ.

$$U = \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[\frac{2(-1)^{(i-1)/2} \cdot R_v \cdot e^{-\alpha x}}{\rho S l (P_i^2 - \omega^2)} \left(\frac{P_0}{2} + \frac{P_0}{\pi} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(i-1)/2}}{i} \sin i \omega t \right) \right] \sin \frac{i \pi x}{2l} \quad (7)$$

Или

$$U = \frac{R_v \cdot e^{-\alpha x} \cdot P_0}{\rho \cdot S \cdot l \cdot \pi} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(i-1)/2}}{P_i^2 - \omega^2} (\pi + 2 \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(i-1)/2}}{i} \sin i \omega t) \sin \frac{i \pi x}{2l}. \quad (8)$$

Для двухцилиндровых насосов двойного действия с учетом гармонического закона изменения давления жидкости выражение (8) можно записать следующим образом:

$$U = \frac{2R_v e^{-\alpha x} P_0 \sin \omega t}{\rho S l} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(i-1)/2}}{(P_i^2 - \omega^2)} \sin \frac{i \pi x}{2l}. \quad (9)$$

Растягивающие напряжения, возникающие в колонне, определяются на основании выражений, приведенных в [11], преобразованных с учетом исследования значения напряжений в каждом сечении колонны труб,

$$\sigma_x = \left(\frac{1 - \mu}{1 - 2\mu} \right) \cdot E \cdot u \cdot \left(1 - \frac{x}{l} \right), \quad (10)$$

где μ — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости материала труб, МПа; x — произвольное сечение колонны труб, м; l — длина колонны труб, м.

Полученные выше выражения были определены для случая абсолютно вертикальной скважины при отсутствии сил трения ($F_{mp} = 0$).

При использовании пакера в нижней части колонны НКТ продольные колебания последней будут отсутствовать (при условии полной герметизации затрубного пространства), но появятся поперечные колебания, следовательно, к напряжениям растяжения (уже меньшим в 3 раза) добавятся напряжения сдвига. Амплитуда изменения давления жидкости действует по всей колонне, вызывая поперечные колебания, изменяющиеся по частоте колебания жидкости.

По полученным выражениям (9) и (10) были построены графические зависимости перемещения нижнего конца и напряжения в верхнем сечении колонны НКТ от частоты гидравлических ударов, представленные на рисунках 1 и 2. В качестве основных исходных данных были выбраны следующие величины, соответствующие данным при обработке забойным импульсным устройством скв. 2 378 НГДУ «Туймазанефть»: длина колонны НКТ — 1 250 м; давление закачки на устье скважины — 12 МПа; диаметр колонны НКТ (толщина стенки) —

73 мм (5,5 мм); частота колебания жидкости — 100 Гц; плотность жидкости — 1 000 кг/м³.

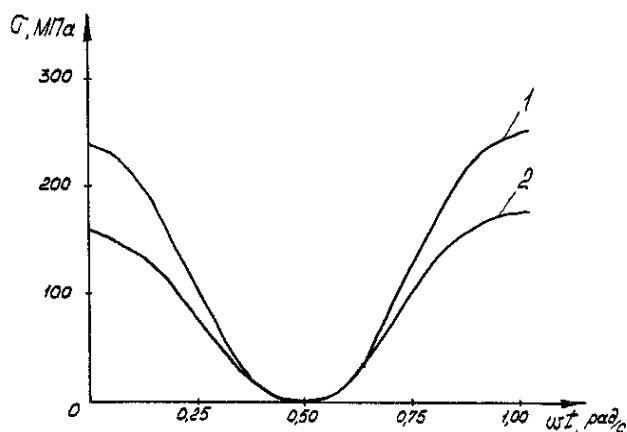


Рис. 2. Напряжение в верхнем сечении колонны НКТ:

1 — без установки пакера; 2 — с установкой пакера (полная герметизация затрубного пространства) — суммарные напряжения растяжения и сдвига

Таким образом, в результате анализа приведенных кривых было установлено, что применение забойных импульсных устройств с большей площадью сопротивления потоку жидкостной струи уменьшает надежность колонны НКТ, причем это зависит прямо пропорционально как от конструктивных особенностей устройства, так и от расхода нагнетаемой жидкости в пласт. Сопоставляя полученные теоретические результаты, представленные на рисунке 2, можно сделать вывод, что надежность колонны НКТ повышается в 1,8 раза при использовании пакера для обводнения забоя обрабатываемой скважины.

Библиографический список

1. Хабибуллин М. Я. Разработка вибротехники для эффективной закачки жидкости в нефтяной пласт: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Уфа, 1999. — 23 с.
2. Хабибуллин М. Я. Экспериментально-теоретические исследования вытеснения нефти водой с циклически изменяющейся амплитудой давления // Нефтегазовое дело. — 2012. — № 6. — С. 233–241.
3. Патент на изобретение RUS 2198288. Способ закачки жидкости в нагнетательные скважины и устройство для его осуществления / Султанов Б. З., Тухтеев Р. М., Хабибуллин М. Я.; заявл. 12.10.99; опубл. 10.02.03.
4. 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.
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. Повышение эффективности закачки жидкости в нагнетательные скважины // Современные технологии в нефтегазовом деле — 2015: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. / Отв. ред. В. Ш. Мухаметшин. — Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. — С. 161–167.
7. Хабибуллин М. Я. Повышение эффективности методов заводнения в системе поддержания пластового давления // Современные технологии в нефтегазовом деле — 2014: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. (Октябрьский, 25 марта 2014 г.) / Отв. ред. В. Ш. Мухаметшин. — Уфа: Изд-во УГНТУ. — 2014. — С. 392–397.
8. Хабибуллин М. Я., Шангареев Р. Р. Исследование процессов влияния давления и частоты импульсов на проникновение жидкости в песчаных образцах // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2016. — № 4. — С. 120–125.
9. Патент на изобретение RUS 2241825. Устройство для закачки жидкости / Гилаев Г. Г., Тухтеев Р. М., Хабибуллин М. Я., Ибраев Р. А.; заявл. 13.02.03; опубл. 10.12.04.

10. Параметры гашения колебаний колонны насосно-компрессорных труб при работе забойных импульсных устройств / М. Я. Хабибуллин [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 6. – С. 19–23.
11. Хабибуллин М. Я., Сидоркин М. Я. 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.
12. 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.
13. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.
14. Корн Г. А., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
15. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Расчеты в теоретической и прикладной механике. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2016. – 94 с.
16. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Применение электронных таблиц в расчетах нефтегазопромыслового оборудования // Современные технологии в нефтегазовом деле — 2016: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию филиала. – Уфа, 2016. – С. 10–13.

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

Сидоркин Дмитрий Иванович, к. т. н., доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. 8(34767)65401, e-mail: npmo@mail.ru

Зайнаглина Ляйсан Зульфаровна, к. т. н., доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. 8(34767)65401, e-mail: npmo@mail.ru

Information about the authors

Khabibullin M. Ya., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technological 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 Technological University, phone: 8(34767)65401, e-mail: rustamsul@rambler.ru

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, tel. 8(34767)65401, e-mail: npmo@mail.ru

Zainagalina L. Z., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technological University, tel. 8(34767)65401, e-mail: npmo@mail.ru