

УДК 622.276

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН
ДАВЛЕНИЯ В ЗАКАЧИВАЕМОЙ ЖИДКОСТИ
ОТ УСТЬЯ ДО ЗАБОЯ СКВАЖИНЫ**

**INVESTIGATION OF THE MECHANISM OF THE PRESSURE WAVES
DISTRIBUTION IN THE INJECTED FLUID FROM
THE WELLHEAD TO THE BOTTOM HOLE**

М. Я. Хабибуллин, Р. И. Сулейманов, М. Л. Галимуллин, Л. М. Зарипова
M. Ya. Habibullin, R. I. Suleymanov, M. L. Galimullin, L. M. Zaripova

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

*Ключевые слова: пласт; скважина; устье; забой; пульсатор; Гельмгольц;
потенциал; скорость*

Key words: seam; chink; embouchure; slaughtering; pulser; Helmholtz; capacity; speed

Создаваемые упругие волны на устье скважины на ее забой передаются через поток жидкости. При этом часть энергии этих волн уходит на преодоление диссипативных сил, а часть доходит до забоя скважины и распространяется в пласт. Проникая в глубь пласта, волны приводят к изменению характера распределения давления в нем и увеличению его проницаемости [1–5].

Этой проблеме посвящены работы, в которых, однако, не учитывается динамическая связь системы пласт — скважина. Например, в работах [6–8] рассмотрено влияние упругих волн на пласт и призабойную зону, когда генератор упругих волн установлен на забое скважины. Здесь же отмечено, что помимо забойных конструкций импульсных устройств существуют и устьевые разновидности аналогичного назначения, применение которых в некоторых случаях оправдано. Использование устьевых пульсаторов исключает дополнительное использование материальных затрат, связанных со спуском в скважину колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) (при соблюдении надежности эксплуатационной колонны), и, что самое главное, на наш взгляд, позволяет вести непосредственный контроль за работой устройства, регулируя и внося коррективы в режимные параметры.

На практике генератор упругих волн легче установить на устье скважины. При этом упругие волны передаются на забой скважины через поток закачиваемой жидкости. Поэтому исследование распространения упругих волн через поток жидкости с учетом динамической связи системы пласт — скважина представляет как научный, так и практический интерес.

Рассмотрим совместно процесс плоскорадиальной фильтрации гомогенной жидкости в однородном пласте и динамику течения поступающей жидкости в колонне НКТ. При этом на устье скважины генератором создаются упругие волны, передающиеся через поток жидкости в пласт.

В связи с этим возникает необходимость рассмотреть распространение колебаний жидкости от устья до забоя скважины для определения оптимальных параметров, необходимых при разработке новых конструкций устьевых пульсаторов. Рассмотрим трубу с круглым сечением. В цилиндрической системе координат волновое уравнение имеет вид [9–11]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где $\Phi(r, \varphi, z, t)$ — потенциал скорости потока жидкости; c — скорость распространения колебаний.

Потенциал скорости потока жидкости создает возмущающие упругие волны, которые через поток закачиваемой жидкости передаются на забой скважины. Эти волны могут иметь различные формы. В данной работе рассматривается трапециевидальная форма изменения возмущающих упругих волн.

Решение уравнения (1) должно представляться конечными и дифференцируемыми функциями координат для области $0 \leq r \leq a$ (где a — радиус трубы); $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; $-\infty \leq z \leq +\infty$. Для жесткой трубы (абсолютно нерастяжимые и неупругие стенки) эти функции должны удовлетворять условию исчезновения радиальной составляющей скорости на поверхности трубы, то есть

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right|_{r=a} = 0$$

Для установившихся гармонических колебаний представим потенциал скорости в виде $\Phi = \psi(r, \varphi, z)e^{i\omega t}$ и после подстановки в волновое уравнение получим уравнение Гельмгольца относительно амплитудной части $\psi(r, \varphi, z)$ в цилиндрических координатах

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{c^2} \psi = 0. \quad (2)$$

Если искомую функцию представить в виде $\psi(r, \varphi, z) = R(r) \cdot x(\varphi) \cdot Z(z)$, то уравнение Гельмгольца разделится на три обыкновенных дифференциальных уравнения второго порядка относительно функций R, x, z :

$$\frac{d^2 x}{d\varphi^2} + m^2 x = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d^2 z}{dz^2} + \gamma^2 z = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left(k^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) R = 0, \quad (5)$$

где $k^2 + \gamma^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$, $m = 0, 1, 2, \dots$.

Решение уравнений (3)–(5) приведено в [12]. Здесь уместно отметить, что в данном конкретном случае колебания жидкости происходят в частном диапазоне, нижняя граница которого ~ 5 Гц, а максимальный диаметр трубы $d_{max} \sim 0,11$ м. Таким образом, длина волны колебаний ($\lambda \sim 3 \cdot 10^7$ м, что соответствует частоте 5 Гц) гораздо больше диаметра трубы. Согласно критерию «узкой» трубы $d < 1,22\lambda$ [12], в этом случае могут существовать только бегущие плоские волны, которые распространяются с фазовой скоростью c .

По мере распространения колебаний жидкости их амплитуда уменьшается. Для данных условий это связано с диссипативными процессами, вызываемыми вязкостью и теплопроводностью среды, влиянием стенок, а также рассеянием на неод-

нородностях. Для амплитуды давления колебательного процесса, описываемого плоской волной, существует следующая зависимость:

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha x}, \quad (6)$$

где α — коэффициент поглощения (в соответствии с формулой Стокса — Кирхгофа [12]):

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \theta \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right], \quad (7)$$

где c — скорость распространения колебания с частотой ω .

Для данной рабочей жидкости $c_v = c_p$; теплопроводность $\theta = 0,597 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{с}}$; плотность жидкости в невозмущенном состоянии (колебания отсутствуют) $\rho_0 = 1,25 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; вязкость $\eta = 10^6 \text{ кг/с} \cdot \text{м}$. Тогда формула (7) видоизменяется

$$\alpha = \frac{2\omega^2}{3\rho_0 c^3} \cdot \eta. \quad (8)$$

При малых частотах коэффициент поглощения незначителен, что подтверждается дальнейшими расчетами [13–15] (рис. 1, 2).

На рисунке 1 приведена зависимость амплитуды (6) давления от глубины скважины для колебаний с различными частотами при рабочем давлении на устье $1,4 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$.

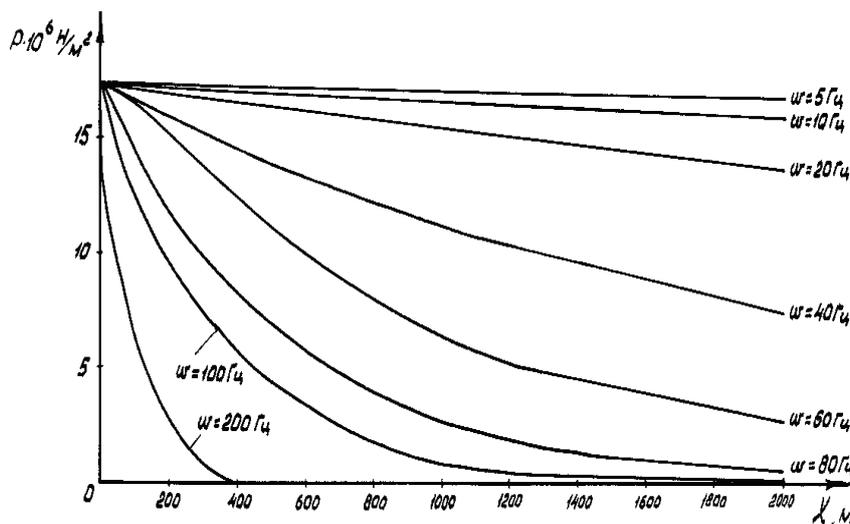


Рис. 1. Зависимость амплитуды давления от глубины скважины при различных частотах пульсации жидкости

Для частот, не превышающих 20 Гц, потери в амплитуде давления вследствие диссипативных процессов порядка 17 % до глубины скважины в 2 000 м. При более низкочастотных колебаниях наблюдается значительное затухание, что прослеживается также по зависимости амплитуды от частоты при средней глубине скважин $x = 1\ 600 \text{ м}$ (см. рис. 2).

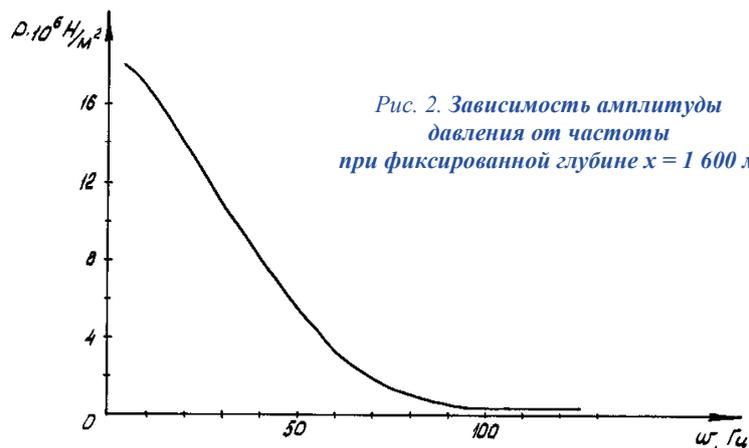


Рис. 2. Зависимость амплитуды давления от частоты при фиксированной глубине $x = 1600$ м

На рисунках 3, 4 представлены результаты численного расчета при заданных выше исходных данных для определения изменения забойного давления.

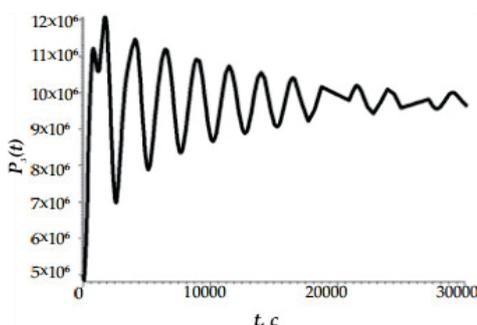


Рис. 3. График изменения забойного давления в зависимости от времени $R_k = 100$ м; $r = 0,75$ м

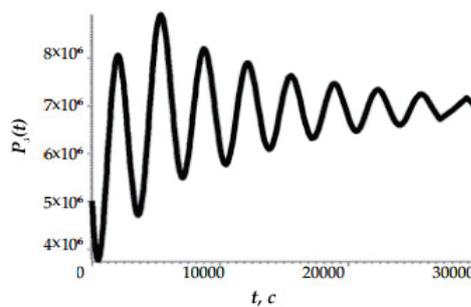


Рис. 4. График изменения забойного давления в зависимости от времени $R_k = 200$ м; $r = 0,75$ м

Забойное давление при трапецидальном изменении устьевого давления носит затухающий колебательный характер (см. рис. 3 и 4). Через некоторое время затухающая часть колебания исчезает, и остается только вынужденная часть. Причем период затухающих колебаний во много раз больше, чем период возмущающего давления. Кроме того, с увеличением радиуса контура пласта амплитудное значение забойного давления уменьшается.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Аббасов Э. М., Агаева Н. А. Распространение упругих волн, создаваемых в жидкости, с учетом динамической связи системы пласт — скважина // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКР. – 2014. – № 1. – С. 77–84.
5. Хабибуллин М. Я., Сидоркин Д. И. Определение параметров колебаний колонны насосно-компрессорных труб при импульсной закачке жидкостей в скважину // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКР. – 2016. – Т. 3, № 3. – С. 27–32.
6. Патент на изобретение RUS 2241825 13.02.2003. Устройство для закачки жидкости. Гиляев Г. Г., Тухтеев Р. М., Хабибуллин М. Я., Ибраев Р. А.
7. Хабибуллин М. Я., Сулейманов Р. И., Давыдов А. Ю. Теоретические и лабораторные исследования работы устройства для импульсной закачки жидкостей в скважину // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 3. – С. 16–21.

8. 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.
9. Мирзаджанзаде А. Х., Шахвердиев А. Х. Динамические процессы в нефтегазодобыче. Системный анализ, диагноз, прогноз. – М.: Наука, 1997.
10. Корн Г. А., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984.
11. Сулейманов Б. А., Аббасов Э. М. Восстановление забойного давления при вытеснении нефти водой с учетом мгновенного прекращения притока в скважину // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2010. – № 2. – С. 20–24.
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. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Информационные технологии в расчетах нефтепромыслового оборудования // Научное обозрение. – 2015. – № 6. – С. 74–83.
14. Петров В. А., Петрова Л. В., Хабибуллин М. Я. Эффективность применения колтюбинговой технологии в условиях НГДУ «Гуймазанефть» // В сборнике: Современные технологии в нефтегазовом в нефтегазовом деле. – 2014. – С. 375–378.
15. Хабибуллин М. Я., Петров В. А. Оборудование подземное установки скважинного штангового насоса. – Уфа, 2015.

Сведения об авторах

Хабибуллин Марат Яхиевич, к. т. н., доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. +79177414994, e-mail: m-hab@mail.ru

Сулейманов Рустэм Исхакович, к. т. н., доцент, зав. кафедрой нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, 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

Зарипова Лилия Мавлитзяновна, 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, Ufa State Petroleum Technological University, Oktyabrsky Branch, phone: +79177414994, e-mail: m-hab@mail.ru

Suleymanov R. I., Candidate of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Oil field Machinery and Equipment, Ufa State Petroleum Technological University, Oktyabrsky Branch, e-mail: rustamsul@rambler.ru

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

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

УДК 622.279.5

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОДАВНОГО ГАЗА НА ПОЗДНЕЙ СТАДИИ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ NEW APPLICATIONS FOR LOW-PRESSURE GAS AT THE END OF FIELD LIFE

Р. Е. Шестерикова, А. А. Шестерикова

R. E. Shesterikova, A. A. Shesterikova

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь

Ключевые слова: низконапорный газ; газопровод; транспорт газа; энергозатраты; новые технологии; компримирование

Key words: low-pressure gas; gas pipeline; gas transportation; energy consumption; new technologies; compression

Низконапорный газ (ННГ), который сжигается на факелах, – это газ, промышленное использование которого с глубоким компримированием и дальнейшим транспортом в настоящее время экономически нерентабельно.

В структуре запасов только Ямало-Ненецкого автономного округа уже сейчас выделяется от 3 до 5 трлн м³ низконапорного газа. В настоящее время стоит задача поиска эффективных путей использования ресурсов углеводородного газа. Основные направления использования ННГ следующие:

- в качестве топлива для получения тепловой и электроэнергии (печи, подогреватели);
- получение сжиженного газа;
- использование в процессах газохимии — производство метанола, СЖТ.