

УДК 622.276.43

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ВОДОЙ, С ЦИКЛИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ АМПЛИТУДОЙ ДАВЛЕНИЯ

Хабибуллин М. Я.

*ФГБОУ ВПО Уфимский государственный нефтяной технический университет,
филиал, г. Октябрьский
e-mail: oksana123123@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматривается процесс ускорения капиллярной пропитки в замкнутых нефтенасыщенных порах. Для оценки эффекта ускорения внедрения воды в неоднородности сравниваются три закона повышения амплитуды давления: равномерно-возрастающий, синусоидальный и параболический. В результате теоретических исследований и математической обработки большого количества экспериментальных данных на стендовых испытаниях было выявлено, что для высокой эффективности импульсной закачки жидкости необходимо использовать параболический закон. При данном законе изменения амплитуды давления происходит наибольшее ускорение капиллярной пропитки, что позволяет значительно уменьшить остаточную нефтенасыщенность углеводородной залежи.

Ключевые слова: капиллярная пропитка, гидроимпульсное воздействие, неоднородность, смачивание, амплитуда давления, регрессионный анализ, критерий Пирсона, критерий Вилкокситона, ускорение, параболический закон, нефтенасыщенность.

Нефтяные пласты многих месторождений России, находящиеся на поздней стадии разработки, характеризуются многообразием строения и сложным минералого-петрографическим составом. Наряду с относительно однородными, монолитными и высоко проницаемыми коллекторами в геологическом разрезе широко распространены пласты с высокой расчлененностью, зональной и слоистой неоднородностью, содержащие низкопроницаемые пропластки различной толщины. В плотных коллекторах с высокой неоднородностью в процессе их разработки при обычном заводнении, вследствие недостаточного охвата воздействием по размеру и по площади, отдельные участки и зоны остаются невыработанными, что снижает нефтеотдачу. В неоднородных пластах возможны ситуации, когда при вытеснении не смешивающихся жидкостей влияние капиллярных сил на процесс вытеснения оказывается детерминирующим. Как правило, данный процесс происходит медленно и

самопроизвольно. Применение импульсной закачки воды в пласт способствует ускорению протекания данного процесса.

В последнее время широкое распространение получает метод гидроимпульсного воздействия на нефтеносные пласты и это не случайно, поскольку он прост в исполнении и имеет наименьшие материальные затраты. Эффективность его применения неоднократно подтверждалась промышленными испытаниями. Однако обоснованное теоретическое истолкование процессов, происходящих при данном воздействии, отсутствует.

В предлагаемой работе рассматривается процесс ускорения капиллярной пропитки блоков и литологических неоднородностей закачиваемой жидкостью на примере трещиновато-пористого пласта при заранее заданных законах изменения амплитуды давления.

В неоднородных пластах возможны ситуации, когда при вытеснении несмешивающихся жидкостей влияние капиллярных сил на процесс вытеснения оказывается детерминирующим. Важнейшим процессом подобного рода является капиллярная пропитка - самопроизвольное впитывание более смачивающей фазы в пористую среду, насыщенную другой фазой. Так обстоит дело, когда малопроницаемый блок породы, насыщенный нефтью, оказывается окруженным со всех сторон водой, продвигающейся по высокопроницаемым участкам.

Пусть цилиндрический образец пористой среды первоначально заполнен менее смачивающей фазой. Боковые поверхности и один из торцов предполагаются непроницаемыми, а свободный торец в начальный момент приводится в соприкосновение со смачивающей жидкостью. В виду разности диаметров каналов в образце происходит противоточная капиллярная пропитка, т.е. смачивающая жидкость вытесняет пластовый флюид. Как правило, данный процесс происходит медленно, самопроизвольно. Применение циклической закачки воды в пласт способствует ускорению протекания данного процесса.

Во время цикла повышения давления нефть, находящаяся в пористых блоках, линзах или прослоях, сжимается и в них входит вода. При цикле же понижения давления содержимое пласта расширяется, но вода удерживается капиллярными силами в тех неоднородностях, в которые она проникла, а нефть выходит.

Для оценки эффекта ускорения внедрения воды в неоднородности на примере трещиновато-пористого пласта обратимся к продифференцированному уравнению обмена жидкости между блоками и трещинами [1].

$$\frac{dV}{dt} + \frac{\alpha}{\mu} \left(\frac{V}{\beta_2} + \frac{dP}{dt} \right) = 0 \quad (1)$$

где V – скорость обмена жидкости в элементарном объеме пласта;

α – коэффициент, характеризующий интенсивность обмена жидкостью между системой блоков и системой трещин;

μ – вязкость нефти;

β_2 – упругость блоков.

Как правило, в существующих конструкциях импульсных устройств гидромеханического типа закон изменения амплитуды давления гидроимпульсного потока жидкостей характеризуется тремя видами: равномерно-возрастающий, синусоидальный и параболический. Характерные кривые представлены на рис. 1, построенные по следующим зависимостям:

а) равномерно-возрастающий:

$$\text{- при } 0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega}; P(t) = P_{\min} + \frac{\omega \cdot t (P_{\max} - P_{\min})}{\pi};$$

$$\text{- при } \frac{\pi}{\omega} \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega}; P(t) = P_{\min} \frac{(2\pi - \omega t)(P_{\max} - P_{\min})}{\pi}$$

б) синусоидальный:

$$\text{- при } 0 \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega}; P(t) = P_{\min} + \frac{(P_{\max} - P_{\min})}{\pi} (1 - \cos \omega t)$$

в) параболический:

$$\text{- при } 0 \leq t \leq \frac{\varphi_1}{\omega}; P(t) = P_{\min}$$

$$\text{- при } \frac{\varphi_1}{\omega} \leq t \leq \frac{\varphi_2}{\omega}; P(t) = \left[\frac{\sqrt{P_{\max}} (\omega t - \varphi_1) + \sqrt{P_{\min}} (\varphi_2 - \omega t)}{\varphi_2 - \varphi_1} \right]^2$$

$$\text{- при } \frac{\varphi_2}{\omega} \leq t \leq \frac{\varphi_3}{\omega}; P(t) = P_{\max}$$

$$\text{- при } \frac{\varphi_3}{\omega} \leq t \leq \frac{\varphi_4}{\omega}; P(t) = \left[\frac{\sqrt{P_{\max}} (\omega t - \varphi_4) + \sqrt{P_{\min}} (\varphi_3 - \omega t)}{\varphi_4 - \varphi_3} \right]^2$$

$$\text{- при } \frac{\varphi_4}{\omega} \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega}; P(t) = P_{\min}$$

Представленное дифференциальное уравнение (1) является линейным первого порядка и имеет интегрирующий множитель

$$\xi = e^{\int \frac{\alpha}{\mu \beta_2} dt} \quad (2)$$

Тогда общее решение уравнения (1) с учетом (2) будет иметь следующий вид:

$$V = \frac{1}{\exp\left(\frac{\alpha t}{\mu\beta_2}\right)} \left[\frac{\alpha}{\mu} \int \frac{dP}{dt} \cdot \exp\left(\frac{\alpha t}{\mu\beta_2}\right) dt + C \right] \quad (3)$$

Для более качественной оценки влияния законов изменения давления на процесс капиллярной пропитки выбираем интервал $\frac{\varphi_1}{\omega} \leq t \leq \frac{\varphi_2}{\omega}$, поскольку для параболического закона (да и для синусоидального закона) основное приращение проникновения жидкости в поры происходит именно в этом интервале времени. Применяя математические преобразования, после подстановки соответствующих зависимостей для данного интервала изменения давления в интегральное уравнение (3) и, учитывая стационарный режим возникновения колебания жидкости, т.е. при $V(0, t) = V(t)$ (поглощением пренебрегаем, т.к. рассматриваем только один период колебания), окончательно получаем выражения для скоростей проникновения жидкости при заданных законах изменения амплитуды давления

$$V_{P.B.} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\pi} \cdot \omega\beta_2; \quad (4)$$

$$V_{\text{син}} = \frac{\alpha(P_{\max} - P_{\min})\omega}{2\mu\left(\frac{\alpha^2}{\mu^2\beta_2^2} + \omega^2\right)} \left(\frac{\alpha}{\mu\beta_2} \sin \varphi - \omega \cos \varphi \right) \quad (5)$$

$$V_{\text{нар}} = \frac{2\beta_2^2\omega}{\varphi_2 - \varphi_1} \left(\sqrt{P_{\max}} - \sqrt{P_{\min}} \right) \left[\sqrt{P_{\max}} \left(\varphi - \varphi_1 - \frac{\omega\mu\beta_2}{\alpha} \right) + \sqrt{P_{\min}} \left(\varphi_2 - \varphi + \frac{\omega\mu\beta_2}{\alpha} \right) \right]; \quad (6)$$

где P_{\max}, P_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения давления;

ω – частота создаваемых импульсов жидкости;

φ – значение угла положения преобразующего органа в заданном интервале

времени.

Результаты расчетов представлены в виде графических зависимостей на рис. 4 (при $P_{\max} = 15$ МПа, $P_{\min} = 5$ МПа, $\omega = 5$ Гц). Полученные данные демонстрируют преимущество при использовании параболического закона изменения амплитуды давления, получаемого соответствующей конструкцией

устройств. При увеличении частоты колебания жидкости прямо пропорциональное увеличение скорости проникновения жидкости в неоднородности будет достигнуто для равномерно возрастающего и параболического закона изменения давления, которое можно наблюдать из выражений (4), (5), (6). Таким образом, при выборе закона изменения амплитуды давления жидкости для ее импульсной закачки в пласт необходимо отдавать большее предпочтение параболическому с точки зрения ускорения капиллярной пропитки неоднородностей.

Конечно, представленные выше результаты были получены в случае полного удержания воды, поступающей в блоки. В связи с этим рассматриваемую скорость обмена воды с нефтью в блоках, т.е. извлечение нефти из блока, следует рассматривать лишь как возможность достижения такой скорости при осуществлении гидроимпульсного воздействия на пласт.

В заключение отметим, что время, необходимое на понижение амплитуды давления от максимального до минимального его значения соответствовало времени удержания воды, внедренной в неоднородности, т.е. (рис.1)

$$\frac{\varphi_4}{\omega} - \frac{\varphi_3}{\omega} = t_{уд}, \quad (7)$$

В свою очередь время удержания воды в неоднородностях на основании проведенных исследований примерно равно времени, затрачиваемому на противоточную или прямоточную капиллярную пропитку данной неоднородности при хорошей связи ее с остальным пластом или

$$t_n = \frac{x^2}{a^2 c^2}, \quad (8)$$

где x – характерное расстояние «фронта» пропитки;
 a – скорость пропитки;
 c – постоянный коэффициент.

Сказанное выше означает, что в процессе разработки месторождения на поздней стадии, на основании изучения данных об остаточной нефтенасыщенности углеводородных залежей, для более качественного ускорения капиллярной пропитки неоднородностей, необходимо использовать конструкции устройств с параболическим законом изменения амплитуды давления и учитывать соответствие периода изменения давления времени, затрачиваемому на прямоточную или противоточную капиллярную пропитку, получаемого путем экспериментальных исследований данной породы.

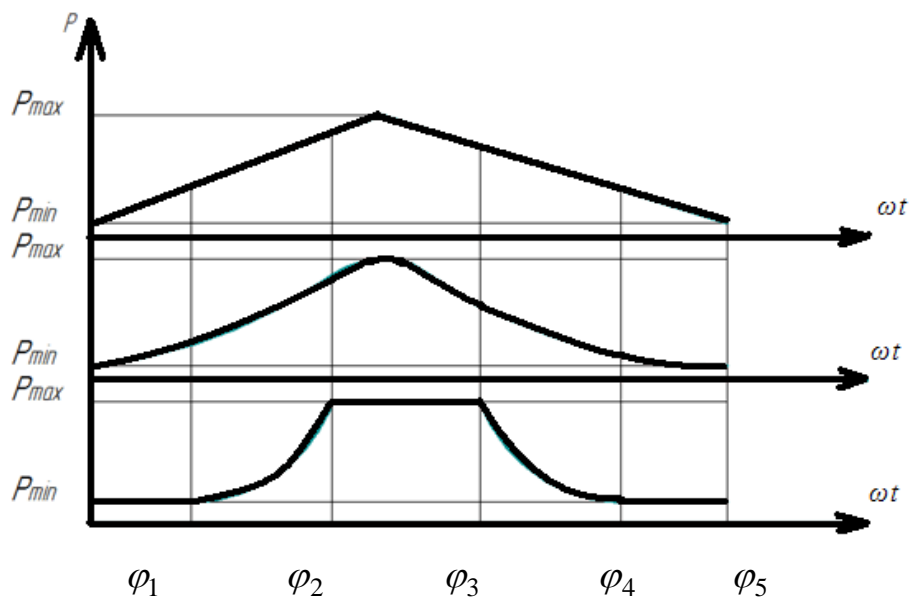


Рис. 1. Зависимости изменения амплитуды давления, создаваемого устройствами, от угла поворота преобразующего органа
1 – равномерно – возрастающая; 2 – синусоидальная; 3 – параболическая

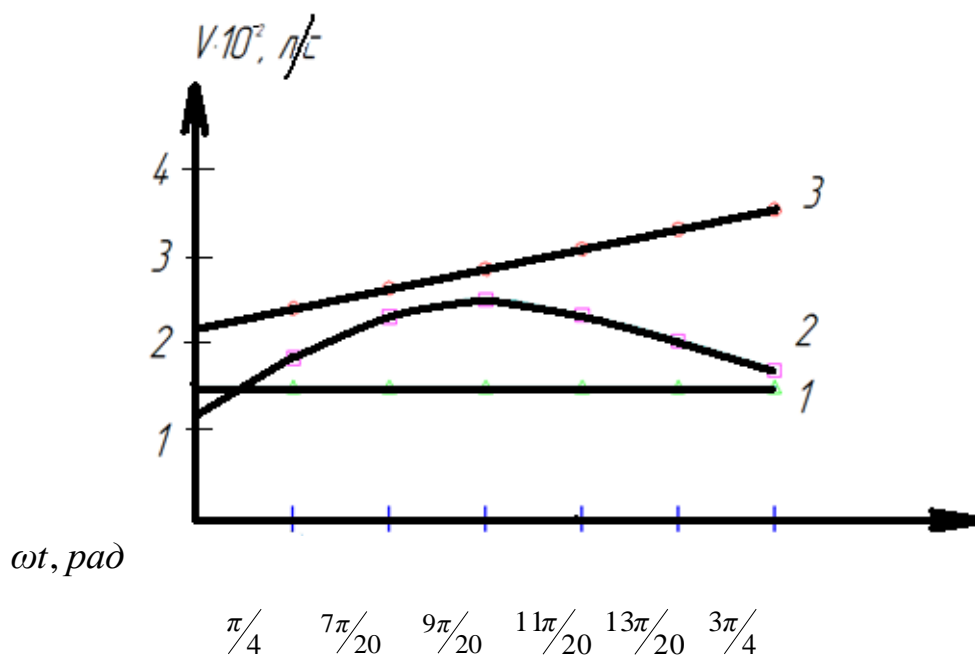


Рис. 2. Скорости проникновения жидкости в поры при различных законах изменения амплитуды колебания давления:
1 - равномерно-возрастающая; 2 - синусоидальная; 3 - параболическая

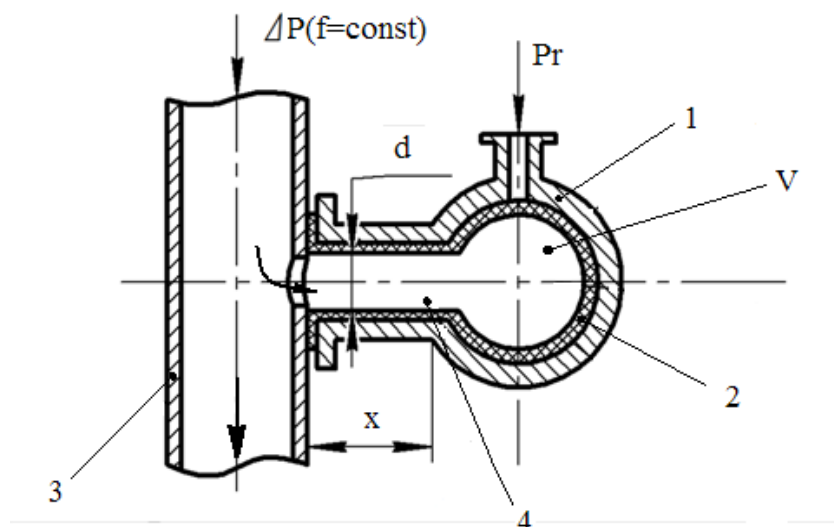


Рис. 3. Лабораторная модель замкнутой поры

При проведении экспериментальных исследований [2] в качестве замкнутой поры выбирался стальной шар 1 с объемом V , во внутренней полости которого располагается резиновый баллон 2 (рис. 3). По трубопроводу 3 циркулировала рабочая жидкость с определенным перепадом давления ΔP и фиксированной частотой колебания f . Между шаром и баллоном создавали горное давление P_r для создания условий упругости поры. Соотношение диаметра d и длины X канала 4 имело три значения: $d/X = 0,2; 0,1; 0,05$. Исходные значения постоянных величин были заданы: $Q = 1,9 \frac{M^3}{ч}$;

$\Delta P = 0,2 \text{ МПа}$; $f = 120 \text{ Гц}$; $P_r = 0,15 \text{ МПа}$; $V = 7,3 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ при максимальном давлении перекачки рабочей жидкости $P_{\max} = 1,2 \text{ МПа}$. Проводилось большое количество замеров (порядка 810) объема жидкости, внедренного в шар \bar{V} при различных значениях времени воздействия $\bar{t} = 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45$ для трех законов изменения амплитуды давления: равномерно-возрастающий, синусоидальный и параболический.

По полученным экспериментальным данным составлены таблицы наблюдений и построены гистограммы частот с интервалом разбиения $K = 9$. Был проведен регрессионный анализ полученных данных, на основании которого выявлены качественные и количественные соотношения между факториальными и результативными признаками. Для построения уравнений регрессии линейного типа $\bar{V} = (d, x, t)$ определялись коэффициенты корреляции и взаимной корреляции факторов [3]. Достоверность этих коэффициентов оценивали с помощью критерия надежности Θ_r и для всех трех законов изменения амплитуды давления составлялась корреляционная матрица, позволившая выделить значимые

коэффициенты корреляции, причем сочетание факторов dx и dxt на результативный признак не выявлено. А проверку гипотезы об адекватности предложенных моделей производили как с помощью параметрического критерия Пирсона X^2 , так и с помощью непараметрического критерия Вилкоксона T , основанный на подсчете рангов.

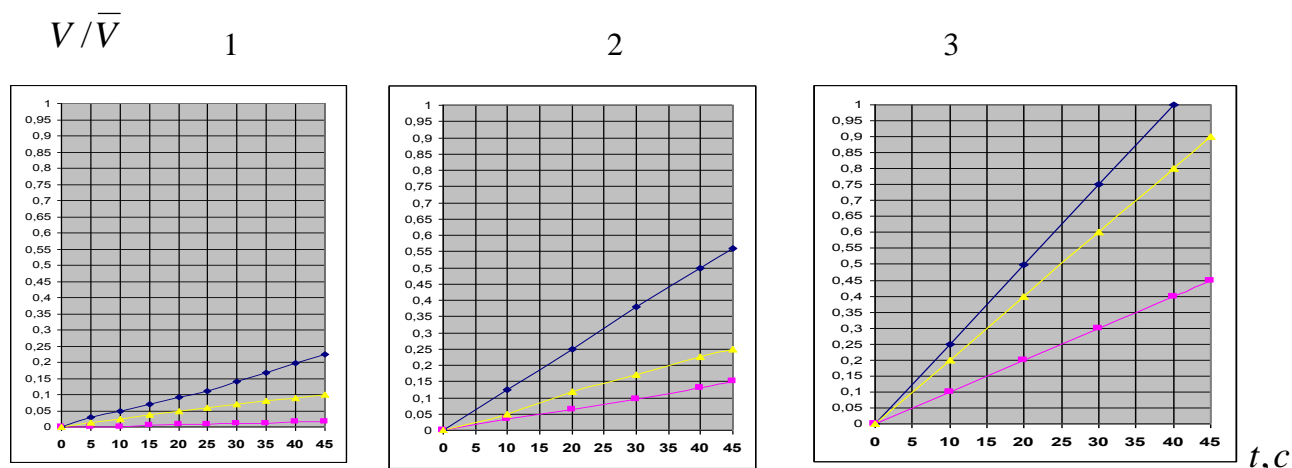


Рис. 4. Зависимость внедренного объема жидкости в шар (\bar{V}/V) от времени ее циркуляции t для следующих законов изменения амплитуды давления:
 1 – равномерно – возрастающий; 2 – синусоидальный; 3 – параболический;
 ♦ – $d/x=0,20$; Δ - $d/x = 0,10$; ■ – $d/x = 0,05$

По полученным уравнениям регрессии и проведенной аппроксимации расчетных значений относительно средних величин получены следующие графические зависимости (рис.4) объема внедренной рабочей жидкости в безразмерной величине $\bar{V}/V = \varphi(t)$. Анализ статистических зависимостей показывает, что при равной вязкости жидкости с увеличением диаметра канала d относительно его длины x объем внедрившейся жидкости увеличивается, что вполне согласовывается с предварительными теоретическими утверждениями.

Выводы. В целях дальнейшей детальной проработки данного метода импульсного воздействия на пласт необходимо будет учитывать вязкость закачиваемой жидкости, упругость породы, диаметр канала. Из трех законов изменения амплитуды давления для импульсной закачки жидкости необходимо выбирать параболический, что убедительно подтверждают и лабораторные исследования, что обеспечивает повышения эффективности и ускорения капиллярной пропитки нефтенасыщенных блоков и позволит значительно уменьшить остаточную нефтенасыщенность углеводородной залежи.

Литература

1. Желтов Ю.Н. Механика нефтегазоносного пласта М.: Недра, 1975. 216с.
2. Хабибуллин М.Я. Разработка вибротехники для эффективной закачки жидкости в нефтяной пласт: дисс... канд. техн. наук. Уфа, 1999. 149с.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников инженеров. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 833 с.

EXPERIMENTAL THEORETICAL RESEARCH OF OIL DISPLACEMENT BY WATER WITH CYCLICALLY CHANGING PRESSURE AMPLITUDE

M.Ya. Khabibullin,

*FSBEI «Ufa state petroleum technical university», branch in Otyabrsky
e-mail: oksana123123@mail.ru*

Abstract. *The paper deals with the process of acceleration of capillary imbibition in closed oil-saturated pores. To estimate the effect of heterogeneity water intrusion acceleration the three pressure amplitude increase laws are compared: evenly increasing, sinusoidal and parabolic. As the result of theoretical research and mathematical analysis of great amount of experimental data it was revealed that it is necessary to use parabolic law for high impulse water injection efficiency. Under this pressure amplitude change law we record the highest capillary imbibition acceleration that enables to greatly decrease residual oil saturation of hydrocarbon reservoir.*

Keywords: *capillary imbibition, hydroimpulse influence, heterogeneity, wetting, pressure amplitude, regressive analysis, Pierson criterion, Wilcocksiton criterion, acceleration, parabolic law, oil saturation.*

References

1. Zheltov YN Mechanics of oil and gas reservoir, Nedra, 1975. 216s.
2. Khabibullin MJ Vibrotehnika development for effective fluid injection into the oil reservoir: diss ... cand. tech. Science. Ufa, 1999. 149s.
3. Korn G., Korn T., Mathematical Handbook for Scientists Engineers. Nauka. Home edition physical-mathematical literature, 1984. 833 s.