

DOI 10.5862/JEST/6

УДК 622.245.54

Н.И. Николаев, А.В. Шипулин, К.С. Кунавых

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ОСВОЕНИЯ СКВАЖИН

N.I. Nikolayev, A.V. Shipulin, K.S. Kupavikh

ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT OF WELL DEVELOPMENT

Рассмотрены результаты опытов на экспериментальном стенде, который позволяет имитировать трещины нефтяного пласта различной длины и сечения путем замены трубок длиной 0,33, 0,5, 0,66 и 1 м, диаметром 2, 4 и 6 мм. Проанализированы графики давления в трещине на различных расстояниях от полости скважины при начальных давлениях 5, 10 и 20 атм. Математически определен закон изменения давления в трещинах пласта при формировании импульсного давления на устье скважины. Расчеты показывают возможность эффективной передачи энергии импульсно-волновым способом от устья скважины в систему трещин прискважинной зоны. Обосновано, что технология развития сети трещин в прискважинной зоне пласта за счет гидроударов не требует применения погружного оборудования, используется минимальное количество техники, применяемой на устье при ремонте скважины. Приведены доводы в пользу энергетической эффективности импульсно-волнового воздействия на забой скважины.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ; ОСВОЕНИЕ СКВАЖИН; ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ; УДАРНАЯ ВОЛНА; КИСЛОТНАЯ ОБРАБОТКА; ВЯЗКАЯ НЕФТЬ.

The paper describes the results of the experiment stand which imitates the crack in the oil stratum. The experiment stand allows modeling cracks of various length and cross-section by changing tubes having length of 0,33, 0,5, 0,66 and 1 m, with the diameter of 2,4 and 6 mm. The authors analyzed charts of pressure in the crack measured at different distances from the borehole cavity at 5, 10 and 20 atm. The paper provided mathematical description which shows the correlation between pressure changes in the oil stratum crack when forming the impulse pressure at the cellar. The calculations show the improved energy efficiency transmission by using an impulse wave method from the cellar to the system of cracks in the near-well zone. It was validated that the technology of developing the system of cracks in the near-well zone of the stratum due to hydropercussion do not require the usage of submersible equipment; the minimum amount of equipment for well repair is used. The energy efficiency of impulse wave impact on the well face is proved.

ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT; DEVELOPMENT OF WELLS; HYDRODYNAMIC TREATMENT; SHOCK WAVE; ACIDIZING; VISCOUS OIL.

При эксплуатации любого месторождения углеводородов благоприятные условия и высокие коэффициенты нефтеотдачи обусловлены продуктивностью пласта. Традиционные методы вызова притока, основанные на принципе снижения давления в скважине за счет уменьшения плотности жидкости или ее уровня, не всегда дают возможность получения необходимой величины депрессии. Для притока пластового флюида используют такие методы освоения

скважин в осложненных условиях, как кислотная обработка, свабирование, гидроразрыв пласта, а также торпедирование, плазменно-импульсное воздействие и т. д.

При этом особое значение имеет энергоэффективность процесса освоения скважины. Доля энергетической составляющей в себестоимости проведения технологической операции может достигать 60 %. Поэтому при выборе способа обработки призабойной зоны пласта необходимо



особое внимание уделять энергетической и экономической эффективности применяемого метода. Технология гидродинамического воздействия на пласт выгодно отличается от альтернативных подходов именно в плане энергетических затрат. Применение методики не требует высокопроизводительного оборудования и дорогостоящей техники. Первоначальное воздействие возможно увеличить в 4–5 раз при обработке требуемого участка пласта, что значительно сокращает потребности в мощности приводящего агрегата.

Альтернатива вышеперечисленным методам, имеющим как положительные, так и отрицательные качества, предлагается применение комплексного воздействия на продуктивный пласт, которое заключается в комбинировании гидродинамического воздействия на пласт с его кислотной обработкой. При многократно повторяющихся гидроударах в совокупности с нагнетанием кислотных растворов, применяемых в качестве расклинивающей жидкости, постепенно увеличивается глубина и раскрытость трещин, а следовательно, облегчаются условия проникновения кислотного раствора в слабопроницаемый пласт. Причем эффективность проникновения кислотного раствора возрастает по мере увеличения амплитуды пульсаций и кратности их осуществления [1]. Особенность предлагаемого решения: вместо приложения высокого давления призабойную зону подвергают сериям коротких ударов, при которых жидкость не успевает фильтроваться в образующиеся трещины и увеличивать их длину. Короткие удары способствуют развитию прилегающих трещин, выкрашиванию породы, образованию каверн вокруг призабойной зоны и увеличению ее эффективного радиуса. Раскачка массы скважинной жидкости способствует глубокому проникновению волны движения в пласт, размыву породы и эффективному извлечению загрязнений, закупоривающих трещины пласта.

Волны давления и разрежения, перемещаясь по полости скважины от устья к забою и обратно, создают удары, в том числе в призабойной зоне, и способствуют отрыву адсорбционных отложений от стенок поровых каналов и трещин, импульсной закачке в пласт кислотного раствора. При колебательном движении жидкости закачиваемый рабочий агент не уходит

в какую-либо промоину, а более равномерно распределяется в призабойной зоне вокруг перфорации скважины; кроме того, размывается углеводородная пленка на стенках поровых каналов и трещин, что улучшает контакт рабочего агента с породой пласта, способствует облегченному удалению продуктов химической реакции. При штатной кислотной обработке прискважинной зоны движение жидкости производится только в одном направлении — в пласт. Движение жидкости из пласта в скважину применяют только для удаления продуктов химической реакции. Если при кислотной обработке одновременно применять колебания скважинной жидкости и проводить несколько циклов с одновременной промывкой, эффективность обработкикратно возрастает.

Колебания с частотой менее одного герца имеют малое затухание, поэтому периодические изменения забойного давления передаются в виде волн низкой частоты по простиранию пластов и способствуют перераспределению напряжений в массиве, что положительно влияет на нефтеотдачу. Вязкая нефть является неньютоновской жидкостью, и ее вязкость определяется пространственной решеткой, образуемой кристаллами парафинов, которая разрушается при механическом воздействии. Следовательно, при обработке месторождений вязкой нефти колебания столба скважинной жидкости вызывает разрушение пространственной решетки за счет регулярной ее деформации и изменение ее реологических свойств с постепенным уменьшением вязкости.

Так как в реальных условиях не представляется возможным измерить глубину и величину проникающей в пласт ударной волны, был разработан экспериментальный стенд (рис. 1) для физического моделирования технологических операций при обработке пласта.

Порядок проведения эксперимента принят следующий. Сборка модели осуществляется для заданных условий глубины скважины и проницаемости пласта. Трубки, имитирующие капилляры продуктивного пласта, выбирают диаметром 2, 4 или 6 мм, их длина может варьироваться от 0,25 до 5,75 м с минимальным шагом 0,25 м. Затем поочередно подключают манометр к каждой измерительной точке, имитирующей забой скважины, а также между сек-

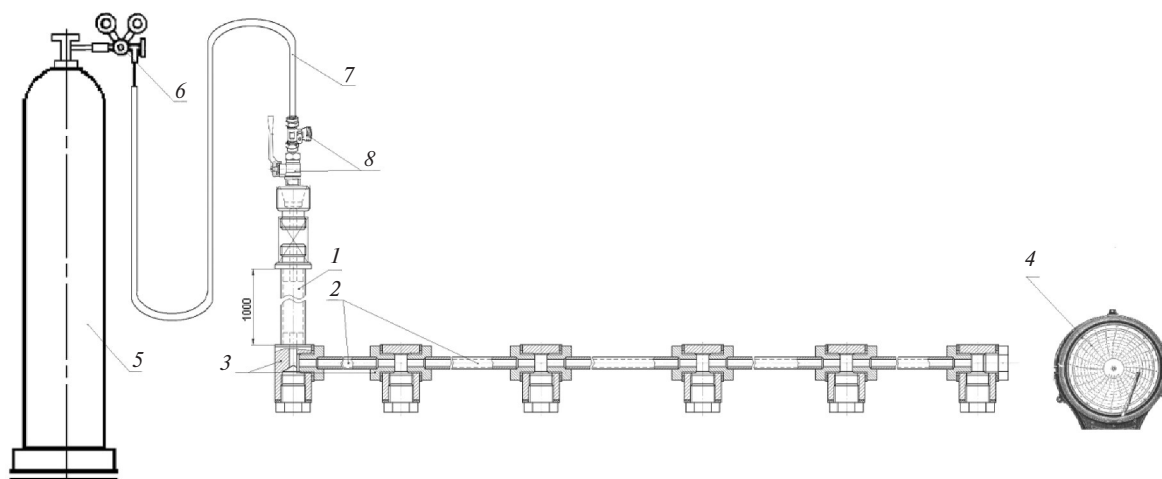


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 — трубы с внутренним диаметром 20 мм, которые имитирует скважину, и имеют разную длину: 0,33, 0,5, 0,66 и 1 метр; 2 — трубы малого диаметра (внутренний диаметр 2,4 и 6 мм) с длиной секции 1 м, имитирующие капилляры продуктивного пласта; 3 — соединительные тройники, устанавливаются на искусственном забое и между каждыми (секциями) труб малого диаметра; имеется возможность подключения манометра к каждому тройнику; 4 — скважинный манометр «M/D Totco»; 5 — газовой баллон высокого давления с азотом; 6 — газовой редуктор; 7 — шланг высокого давления внутренним диаметром 16 мм и длиной 2 м; 8 — шаровые краны для подачи ударного импульса и стравливания давления

циями трубок. При каждом подключении модель заполняют водой до искусственного устья во избежание воздушных пробок. Затем подключают шланг высокого давления. С помощью редуктора выставляют давление в 5, 10 или 20 атм., при котором проводят эксперимент, и измеряют импульсное давление гидроудара. В каждой расчетной точке производят не менее трех измерений для каждого заданного на редукторе давления, затем рассчитывают среднее значение измерений. Все измерения фиксируются на диаграмме пишущего манометра. На основании полученных данных строят график замеров давлений в расчетных точках экспериментального макета, при помощи которых можно определить характер распространения перепадов давления по трещинам пласта.

На разработанной физической модели эксперименты были проведены при следующих условиях: глубина скважины — 1 м; общая длина модели пласта — 5 м; диаметр секций — 2, 4 или 6 мм; длина секции — 1 м; давления на редукторе — 5, 10 или 20 атм.

Результаты экспериментов, проведенных по описанной выше методике, представлены в виде графиков, отображенных на рис. 2 а, б, в.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. С уменьшением диаметра капилляра пиковые значения давлений гидроудара увеличиваются до определенного значения, затем импульс затухает, т. е. происходит увеличение импульсного давления по мере удаления от забоя в пласт. Высокое значение импульса давления в трещинах пласта увеличивает проницаемость призабойной зоны, развивая систему трещин.

2. Из графиков видно: на забое практически не наблюдается высоких импульсов давления, что позволяет судить о безопасности гидроударов для целостности обсадной колонны и цементного камня.

3. Графики показывают, что с уменьшением диаметра трубки увеличивается расстояние импульса давления максимального значения от забоя. При диаметре трубки 2 мм максимальное значение давления находится на расстоянии 4 м от искусственного забоя, при диаметре 6 мм — 3 м.

Для подтверждения полученных результатов были проведены эксперименты с трубкой 2 мм на укороченной модели (4 метра). Полученные данные представлены на рисунках 3, а, б, в.

Из графиков на рисунках 5, 6 и 7 очевидно, что результаты совпадают и пиковые значения давления гидроудара находятся на удалении 4 м от искусственного забоя. Это позволяет исключить эффект окончания модели.

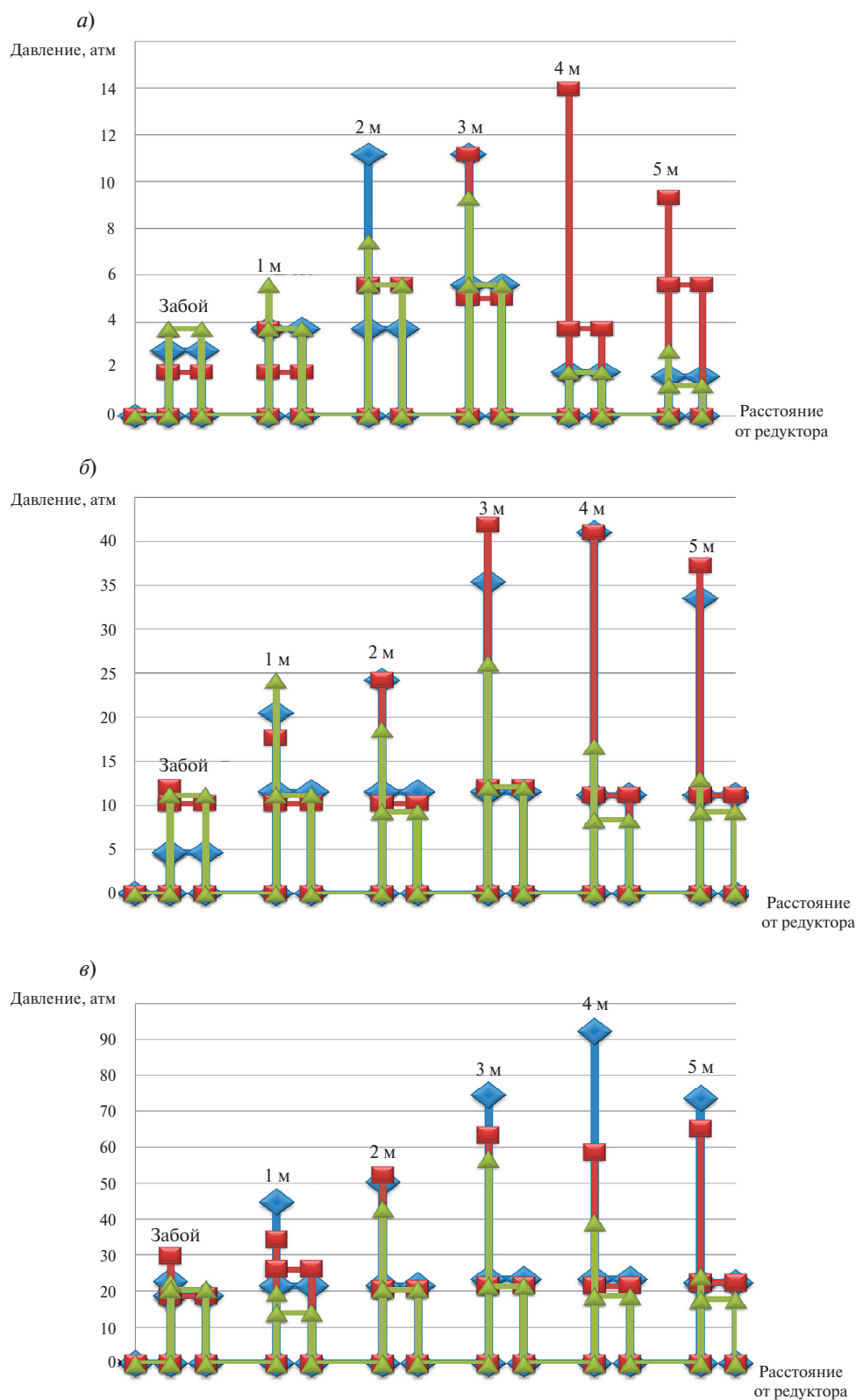


Рис. 2. Характер распространения ударной волны
при начальных давлениях на редукторе 5 (а), 10 (б) 20 (в) атм.
при значениях диаметра трубки (— 2 мм; — 2 мм; — 2 мм)

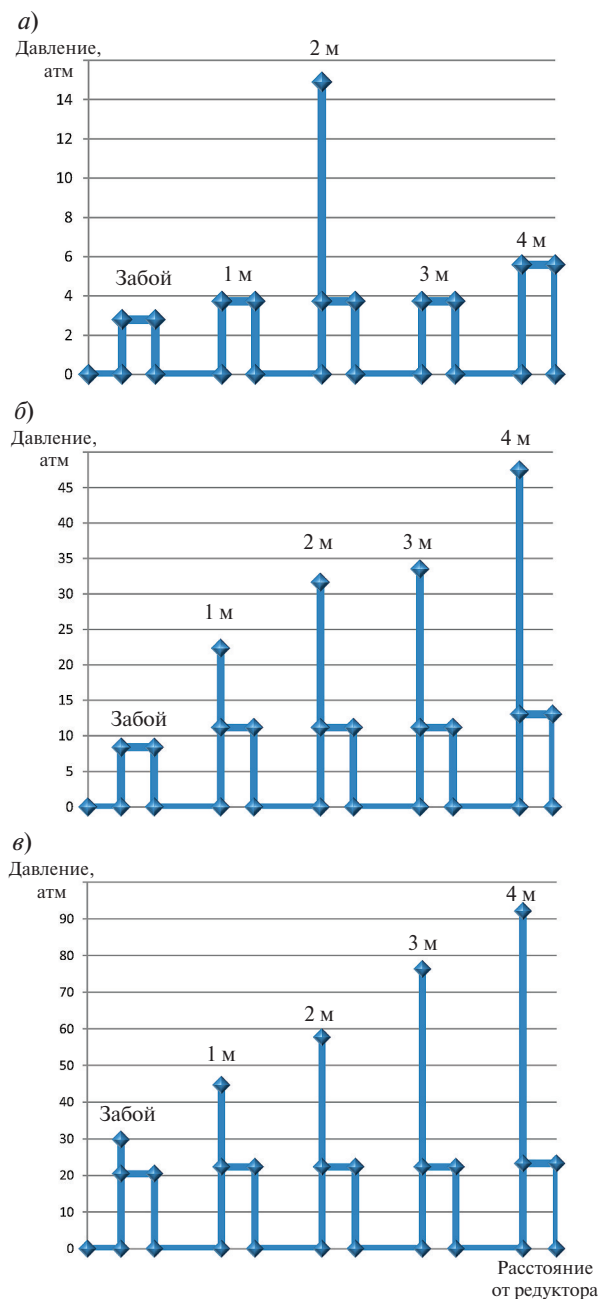


Рис. 3. Характер распространения ударной волны в укороченной модели при начальных давлениях на редукторе 5 (а), 10 (б) 20 (в) атм. (диаметр трубки 2 мм)

Более наглядными и объективными являются графики, полученные при начальном давлении 20 атм., так как при меньших давлениях не всегда можно получить четкие и воспроизводимые при последующих экспериментах данные.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что уменьшение диаметра капилляра способствует удалению от забоя пикового значения

давления, а при серии ударов размеры капилляров увеличиваются и, соответственно, пик давления приближается к забою. Тем самым система трещин в призабойной зоне становится более разветвленной, что и является целью вызова притока.

Передача мощности от скважинной жидкости к пласту осуществляется волнами давления, создаваемыми на свободной поверхности жидкости в насосно-компрессорной трубе (НКТ). При такой передаче мощности интенсивность воздействия на пласт определяется не только амплитудой давления, но также частотой изменения давления во времени и формой импульса давления, т. е. законом изменения давления во времени. При некоторых условиях прохождение волны давления по скважинной жидкости создает удар в нижней части НКТ [2, 3]. При такой передаче мощности жидкость, заполняющая скважину, играет роль проводника волн давления (волновод) [4, 5].

При некоторых условиях прохождение волны давления по скважинной жидкости создает удар («резкое» увеличение давления) в призабойной зоне скважины. Пусть $T > 0$ — период изменения давления $p_0(t)$ на свободной поверхности флюида:

$$p_0(t \pm T) - p_0(t) = 0. \quad (1)$$

Можно доказать, что гидродинамическое давление обладает периодом T в любом сечении $x > 0$ скважины:

$$p(x, t \pm T) - p(x, t) = 0 \text{ при } 0 < x < L.$$

Импульс поверхностного давления за период определяется, как $i = \int_t^{t+T} p_0 dt$, для любого сечения $0 < x < L$ скважины физический смысл имеет осредненное по времени значение давления за время пробега акустической (ударной) волны:

$$\bar{p} = \frac{i}{T} = \frac{c}{T} \int_t^{t+T} p(t) dt. \quad (2)$$

Пусть $T_0 = L/c$; L — глубина скважины; c — скорость ударной, или акустической, волны. Если $T \gg T_0$, то изменение давления происходит медленно по сравнению с акустическим масштабом времени T_0 . Имеет место квазистатическое изменение давления, как например, применяемое при гидравлическом разрыве пласта. Для

ударного воздействия на пласт необходимо, чтобы период T изменения давления в устье скважины или в любом сечении столба флюида $0 < x < L$ был бы сопоставим с T_0 .

Пусть $T_0 = \vartheta T$. Число ϑ показывает, сколько периодов давления содержится в акустическом масштабе времени. Для медленного (квазистатического) изменения давления $\vartheta \ll 1$. Наоборот, для ударного воздействия на пласт необходимо $\vartheta = 0(1)$. При $T \gg T_0$ осредненное давление мало отличается от гидростатического. Давление в устье скважины как функция времени представима рядом Фурье

$$p_0(t) = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^1 p_0(\varphi) \cos[m\pi(\tau - \varphi)] d\varphi, \quad (3)$$

где $\tau = \frac{t}{T}$.

При одном и том же импульсе давления воздействие на пласт определяется гладкостью изменения давления [6–8]. Для возникновения удара достаточно, чтобы разрывы давления $p_0(t)$ и его производной dp_0/dt заполняли конечное или счетное множество точек. Тогда конечные изменения давления или разрывы непрерывности первого рода периодически повторяются при периодическом изменении давления на поверхности флюида. Такие мгновенные изменения давления являются ударами. Известно, что удар — мгновенное наложение неосвобождаемых связей на материальную систему [9, 10]. Возникновение резкого перепада давления обусловлено отражением волны давления от твердого дна скважины или от свободной поверхности в устье скважины, т. е. мгновенным наложением неосвобождаемой связи на волну давления.

Если быстро открыть клапан, соединяющий источник давления и устье скважины, то вниз, к свободной поверхности, будет перемещаться воздушная ударная волна. Достигнув свободной поверхности скважинной жидкости, волна отразится от этой поверхности, как от твердой границы, и вызовет на свободной поверхности перепад давления. При этом вниз, по длине скважины, будет перемещаться ударная волна, вызванная скачкообразным изменением давления на свободной поверхности в устье скважины. Достигнув зумпфа скважины, волна давления отражается и приводит к скачку давления в призабойной зоне. Этот скачок давления через пер-

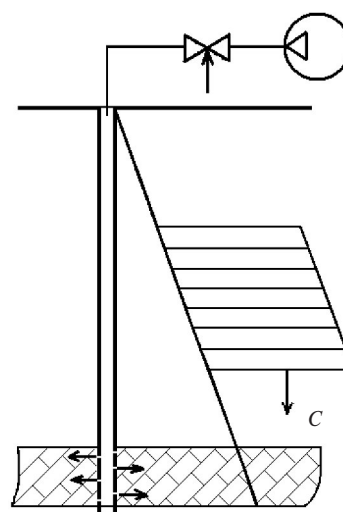


Рис. 4. Технологическая схема передачи давления в скважине

форацию скважины передается в пласт и по трещинам распространяется в массиве породы. Надо иметь в виду, что по мере продвижения вглубь пласта трещины разветвляются и уменьшаются в сечении.

В ряде случаев скачкообразное (ударное) воздействие приводит к увеличению проницаемости пласта за счет хрупкого разрушения скелета и образованию дополнительных микротрещин в коллекторе. Происходит снижение связности пласта: множество пор увеличивается за счет образования микротрещин. У пласта уменьшается топологическая плотность, скелет пласта постепенно превращается в несвязное множество, и, как следствие, увеличивается проницаемость пласта [11].

Такова мотивация импульсно-волнового воздействия на пласт, выступающего в качестве альтернативы гидроразрыву пласта. Гидроразрыв пласта не изменяет проницаемости (связности) коллектора и приводит лишь к образованию конечного количества макротрещин.

Несмотря на относительно небольшую амплитуду ударов (порядка десятков бар, что несопоставимо с давлениями, применяемыми при гидроразрыве пласта), их периодичность и кратковременность приводит к «быстрой» передаче кинетической энергии ударной волны пласту-коллектору. Необходимо определить форму диаграммы давления или по величине среднего за период давления восстановить F -коэффициенты давления.

Примем исходные допущения. При рассмотрении передачи гидроудара столб скважинной жидкости предполагается идеальным акустическим волноводом (несжимаемой невязкой жидкостью). Коэффициент Пуассона для воды $\nu = 1/2$.

$$dp^* = K \frac{dA}{A} = -K \frac{du}{c} = -K \frac{dV}{V}, \quad (4)$$

где $u = u(x, t)$ — скорость движения скважинной жидкости; K — модуль объемного сжатия скважинной жидкости, для воды он принят равным 2×10^9 Па; c — скорость звука; A — площадь сечения.

Уравнения импульсов и неразрывности Сен-Венана образуют гиперболическую систему второго порядка:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + c^2 \frac{\partial \omega}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $u = u(x, t)$ при $0 < x < L$, $t \in T$; L — глубина скважины; T — множество значений времени;

$d\omega = d(\ln A)$ — «упругая энтальпия»; $c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ —

скорость распространения слабой ударной волны по системе «жидкость — трубопровод».

Линеаризация системы описана в известных источниках и составляет основу теории Аллиев — Жуковского в теории удара. Пусть z — это u, ω . Тогда линеаризованная система (1) приводится к уравнению колебаний струны

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad (6)$$

с аperiodическими или периодическими предельными условиями. В первом случае множество $T = (t: 0 < t < \infty)$, во втором случае $T = (t: -\infty < t < \infty)$. Предельные линейные задачи для линейного уравнения колебаний не представляют интереса. В то же время наибольшее количество иллюстративных примеров известно именно для линеаризованной предельной задачи.

Рассмотрим диффеоморфизмы (гладкие точечные преобразования) уравнений Сен-Венана. Первый диффеоморфизм:

$$u, \omega \rightarrow u, x; \quad u = u(t, \omega), \quad x = x(t, \omega);$$

$$\frac{\partial(u, \omega)}{\partial(u, x)} = \frac{\partial \omega}{\partial x} \neq 0; \quad \frac{\partial(x, t)}{\partial(t, \omega)} = -\frac{\partial \omega}{\partial x} \neq 0.$$

Полулагранжев диффеоморфизм введен С.А. Христиановичем в задаче о неустановившемся движении воды со свободной поверхностью и в газовой динамике [9].

Тогда система уравнений Сен-Венана принимает вид

$$\begin{aligned} u_t - \frac{x_t}{x_\omega} u_\omega + u \frac{u_\omega}{x_\omega} + \frac{c^2}{x_\omega} &= 0; \\ x_t - u - u_\omega &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Второй диффеоморфизм:

$$u, \omega \rightarrow t, x; \quad \left| \frac{\partial(u, \omega)}{\partial(u, x)} \right| \in (0, \infty).$$

Тогда исходная система уравнений (1) приводится к системе линейных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial \omega} - u \frac{\partial t}{\partial \omega} + c^2 \frac{\partial t}{\partial u} &= 0; \\ \frac{\partial x}{\partial u} - u \frac{\partial t}{\partial u} + \frac{\partial t}{\partial \omega} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Предельные условия Коши для системы (1):

$$\begin{aligned} u(x, 0) = \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)_{t=0} &= 0; \\ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=0} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = u(L, t) &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\varepsilon = \frac{p(0, t)}{\rho c^2}$.

Перейдем к решению предельной задачи Коши. Для случая равномерного движения волны давления по НКТ общее решение (7) при условии $u_t = 0$, $\frac{\partial(u, \omega)}{\partial(t, \omega)} = 0$ (возмущения с одной и той же упругой энтальпией распространяются с постоянной скоростью) имеет вид

$$x = (u \pm c)t + f(\omega), \quad (10)$$

где $f(\omega)$ — произвольный диффеоморфизм (однозначное дифференцируемое отображение).

Пусть $x = 0$; тогда из предельного условия следует $f(\omega) = \pm \frac{c\omega}{\dot{\varepsilon}} = 0$ и в силу (10)

$$x = (u \pm c)t \pm \frac{c\omega}{\dot{\epsilon}}. \quad (11)$$

Пусть $x = L$; тогда $u = 0$. В силу (11)

$$\omega = \frac{d\epsilon}{dt}(T - t), \quad (12)$$

где $T = L/c$. Значит, для давления $p(L, t)$ в зумпфе скважины получается

$$p(L, t) = K\omega = K \frac{d\epsilon}{dt}(T - t). \quad (13)$$

Например, пусть

$$\epsilon(t) = E \left| \sin \frac{2\pi\tau t}{T} \right| = \begin{cases} E \sin \frac{2\pi\tau t}{T} & \text{при } 0 < t < \frac{T}{2n}; \\ -E \sin \frac{2\pi\tau t}{T} & \text{при } \frac{T}{2n} < t < \frac{T}{n} \end{cases} \quad \text{и т. д.,}$$

где E — амплитуда колебания числа Эйлера (давления) на поверхности флюида. В силу (13) величина давления в зумпфе скважины меняется следующим образом:

$$p(L, t) = \begin{cases} 2\pi EK(1 - \tau) \cos 2\pi\tau & \text{при } 0 < t < \frac{T}{2n}; \\ -2\pi EK(1 - \tau) \cos 2\pi\tau & \text{при } \frac{T}{2n} < t < \frac{T}{n}, \end{cases} \quad (14)$$

где $\tau = t/T$.

В моменты времени τ , кратные $(2n)^{-1}$, величина перепада давления в силу (14) составит

$$\Delta p = \pm 4\pi EK \frac{2n-1}{2n} = 2\pi P_0(2n-1), \quad (15)$$

где P_0 — амплитудное значение давления на свободной поверхности скважинной жидкости.

Если $P_0 = 1$ МПа, $n = 1$, то перепад давления в зумпфе скважины составит величину 6,3 МПа. При удвоении частоты давление в зумпфе скважины вырастает вдвое и т. д. Несложные оценки показывают, что при скорости распространения акустической волны $c = 1000$ м, давлении P_0 порядка 1–10 МПа [12–15] деформация ω составит 10^{-2} – 10^{-3} , т. е. в допустимых пределах упругой деформации стенок.

Математическое решение доказывает, что если ударные волны посылать от устья скважины и чередовать их с приходящими отраженными волнами, то происходит сложение прямых и отраженных волн, перемещающихся по скважине, и образование волн повышенного давления. Такие волны высокого давления образуются без специального скважинного оборудования и способны оказать решающее воздействие на развитие трещин и в целом на проницаемость при-скважинной зоны пласта.

Импульс давления, образующийся на забое скважины, через перфорацию передается в трещины пласта. Трещины являются каналами, по которым волна давления передается вглубь массива аналогично передаче волны к забою в НКТ скважины. Вышеприведенное математическое описание справедливо для процесса передачи давления в трещинах с поправкой на размеры трещинных каналов.

Форма импульсов давления в каналах экспериментального стенда определяется перепадами скорости движения жидкости в трубке и интерференцией прямой и отраженной ударных волн. Фронты импульсов давления, регистрируемых на каждом тройнике стенда, сопровождаются начальными короткими выбросами вследствие сложения отраженных волн согласно (15).

Аналогичные процессы происходят в реальном нефтяном пласте, но трещины пласта постепенно уменьшаются в сечении и не имеют выраженного конца, от которого может отражаться волна. Кроме того, пористый массив пласта способствует затуханию волны давления и передаче ее энергии в пласт. Эта энергия расходуется на деформацию трещин и их развитие, сопровождающееся выкрашиванием фрагментов породы и увеличением эффективного радиуса призабойной зоны.

Выводы

При импульсно-волновом воздействии на скважину энергетические затраты минимизируются за счет неприменения таких энергоемких технологий, как гидроразрыв пласта, термогазовый способ и т. д. Технология развития сети трещин в прискважинной зоне пласта за счет гидроударов не требует применения погружного оборудования, используется минимальное количество техники (обычно насосный агрегат

и автоцистерна). Расчеты показывают возможность эффективной передачи энергии импульсно-волновым способом от устья скважины в систему трещин прискважинной зоны. Энергетическая эффективность импульсно-волнового воздействия

на забой скважины и систему трещин определяется величиной среднего импульсного давления на устье, а также частотой изменения этого давления и ее отношением к «собственной частоте» столба скважинной жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавриленко А.И. Импульсно-реагентный метод воздействия на пласт для месторождений РУП «ПО «Белоруснефть» // Интервал. 2007. № 10. С. 23–28.
2. Патент на изобретение RUS 2266402. Способ возбуждения колебаний скважинной жидкости // Шипулин А.В., Петриченко М.Р., Валеев М.Х., Хуррямов А.М. / 17.11.2003.
3. Уиттекер Е.Т., Ватсон Дж.Н. Современный анализ. Ч.2. М.: ГИФ-МЛ, 1963. С. 233–256.
4. Леонов М.Я., Панасюк В.В. Развитие мельчайших трещин в твердом теле // Прикладная математика и механика. 1959. №5. С. 391–401.
5. Duval G.E. Shock waves in the study of solids // Applied Mechanics Review. 1962. №4. 16 p.
6. Патент РФ 2379488. Способ интенсификации нефтеотдачи пласта и устройство для его осуществления // Бурьян Ю.А., Сорокин В.Н. / 08.08.2007.
7. Патент РФ 2266402. Способ возбуждения колебаний скважинной жидкости // Шипулин А.В., Петриченко М.Р., Валеев М.Х., Хуррямов А.М. / 17.11.2003.
8. Ханукаев А.Н., Миркин В.Г. О распространении волн напряжения при взрыве в твердых породах // Записки Горного института им. Плеханова. 1962. Том 14. №1. С. 3–12.
9. Христианович С.А., Баренблатт Г.И. О модуле сцепления в теории трещин // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1968. №2. С. 70–75.
10. Райзер Ю.П. Высокочастотный разряд высокого давления в потоке газа как процесс медленного горения // Журнал прикладной механики и технической физики. 1968. № 3. С. 3–10.
11. Нигматуллин Р.И., Пыж В.А., Симоненков И.Д. Эффект аномальных колебаний с интенсивными всплесками давления в ударной волне, распространяющихся по водной суспензии бентонитовой глины // Изв. вузов: Нефть и газ. 1983. №11. С. 45–47.
12. Патент РФ 2406816. Способ разработки нефтяной залежи // Хисамов Р.С., Салихов М.М., Рафиков Р.Б., Ащепков Ю.С., Ащепков М.Ю., Сухов А.А. / 18.02.2010.
13. Патент РФ 2406817. Способ разработки нефтяного месторождения // Хисамов Р.С., Файзуллин И.Н., Галимов И.Ф., Ащепков Ю.С., Ащепков М.Ю., Сухов А.А. / 18.02.2010.
14. Патент РФ 2297517. Устройство для автоматической декольматации эксплуатационной многопластовой гидрогеологической скважины // Сердюк Н.И. / 16.12.2004.
15. Патент РФ 2265718. Способ возбуждения колебаний скважинной жидкости // Шипулин А.В., Петриченко М.Р. / 12.05.2004.

REFERENCES

1. Gavrilenco A.I. Impulsno-reagentnyi metod vozdeistviia na plast dlia mestorozhdenii RUP «PO «Belorusneft' [Reagent method stimulation for fields RUP «PO «Belorusneft']. *Interval*. 2007. № 10. S. 23–28. (rus.)
2. Patent na izobretenie RUS 2266402. Sposob возбуждения колебаний skvazhinnoi zhidkosti [A method of excite oscillations wellbore fluid] / Shipulin A.V., Petrichenko M.R., Valeev M.Kh., Hurriamov A.M. 17.11.2003 (rus.)
3. Uitteker E.T., Vatson Dzh.N. Kurs sovremennogo analiza. [A course of modern analysis. Fourt II edition] M.: GIF-ML, 1963. S. 233–256. (rus.)
4. Leonov M.Ia., Panasiuk V.V. Razvitie mel'chaishikh treshchin v tverdom tele [Development of tiny cracks in solids]. *Prikladnaia matematika i mekhanika*. 1959. №5. S. 391–401. (rus.)
5. Duval G.E. Shock waves in the study of solids. *Applied Mechanics Review*. 1962. №4. 16 p.
6. Patent RF 2379488. Sposob intensifikatsii neft-eotdachi plasts I ustroistvo dlia ego osushchestvleniia [Intensification of petroreturn of a layer method and device for its implementation] / Bur'ian Iu.A., Sorokin V.N. 08.08.2007 (rus.)
7. Patent na izobretenie RUS 2266402. Sposob возбуждения колебаний skvazhinnoi zhidkosti [A method of excite oscillations wellbore fluid] / Shipulin A.V., Petrichenko M.R., Valeev M.Kh., Hurriamov A.M. 17.11.2003 (rus.)
8. Khanukaev A.N., Mirkin V.G. O rasprostraneni voln napriazheniia pri vzryve v tverdykh porodakh [On the propagation of stress waves in an explosion in hard rock]. *Zapiski Gornogo instituta im. Plekhanova*. 1962. Tom 14. №1. S. 3–12 (rus.)
9. Khristianovich S.A., Barenblatt G.I. O module stsepleniia v teorii treshchin [On the modulus clutch in the



theory of cracks]. *Izvestiia AN SSSR, Mekhanika tverdogo tela*. №2. 1968. S. 70–75 (rus.)

10. **Raizer Iu.P.** Vysokochastotnyi razriad vysokogo davleniia v potoke gaza kak protsess medlennogo goreniiia [High-frequency discharge of high pressure in a gas flow as a process of slow burning]. *Zhurnal prikladnoi mekhaniki i tekhnicheskoi fiziki*. 1968. № 3. S. 3–10 (rus.)

11. **Nigmatullin R.I., Pyzh V.A., Simonenkov I.D.** E'fekt anomal'nykh kolebanií s intensivnymi vspleskami davleniia v udarnoi volne, rasprostraniiaushchikhsia po vodnoi suspensii bentonitovoi gliny [Effect of abnormal oscillations with intense bursts of pressure in the shock wave propagating in an aqueous suspension of bentonite clay]. *Izv.vyzov: Neft' i gaz*. 1983. №11. S.45–47 (rus.)

12. **Patent RF 2406816.** Sposob razrabotki neftianoi zalezhi [Method of developing oil deposit] / Khisamov

R.S., Salikhov M.M., Rafikhov R.B., Ashchepkov Iu.S., Ashchepkov M.Iu., Sukhov A.A. 18.02.2010 (rus.)

13. **Patent RF 2406817.** Sposob razrabotki neftianogo mestorozhdeniia [Method of developing an oil field] / Khisamov R.S., Faizulin I.N., Galimov I.F., Ashchepkov Iu.S., Ashchepkov M.Iu., Sukhov A.A.18.02.2010/ (rus.)

14. **Patent RF 2297517.** Ustroistvo dlia avtomaticheskoi dekol'matatsii e'kspluatatsionnoi mnogoplastovoi gidrogeologicheskoi skvazhiny [Device for automatic de-colmatation operational multilayer hydrological wells] / Serdiuk N.I. 16.12.2004 (rus.)

15. **Patent RF 2265718.** Sposob возбужdeniia kolebanií skvazhinnoi zhidkosti [A method of excite oscillations wellbore fluid] / Shipulin A.V., Petrichenko M.R. 12.05.2004 (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НИКОЛАЕВ Николай Иванович — доктор технических наук профессор Национального минерально-сырьевого университета «Горный». 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2.. E-mail: nikinik@mail.ru

ШИПУЛИН Александр Владимирович — кандидат технических наук ведущий научный сотрудник Национального минерально-сырьевого университета «Горный». 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2. E-mail: avshipulin@mail.ru

КУПАВЫХ Кирилл Сергеевич — аспирант Национального минерально-сырьевого университета «Горный». 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2.. E-mail: Kupavih@yandex.ru

AUTHORS

NIKOLAEV Nikolai I. — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: nikinik@mail.ru

SHIPULIN Aleksandr V. — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: avshipulin@mail.ru

KUPAVIKH Kirill S. — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: Kupavih@yandex.ru