

УДК 534.64

РЕЗОНАНСНАЯ ОБРАБОТКА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РАЗВЕТВЛЕННЫХ СКВАЖИН ГИДРОИМПУЛЬСНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

В. В. ЯКОВЛЕВ^{1*}, В. А. ТКАЧЕНКО¹, В. В. БОНДАРЬ¹,
В. А. НИКИТИН², Ю. В. ВЕРБА², Г. П. ЗДОЛЬНИК²

¹Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
ул. Желябова, 8/4, 03680, ГСП, Киев-180, Украина
*E-mail: vvyak@yandex.ua

²ООО “Криптон-НК”
просп. Победы, 136, 03115, Киев, Украина

Получено 15.06.2015

Рассмотрена задача об импульсно-волновом воздействии на разветвленную скважину, вызванном открытием/закрытием задвижки на ее устье. Показано, что в разветвленных скважинах существуют резонансные частоты, при которых величина давления может на несколько порядков превышать амплитуду исходного импульса. В соответствии с рассчитанным резонансным режимом проведена обработка нескольких нагнетательных разветвленных скважин на месторождениях Омана с помощью запатентованного гидроимпульсного устройства (ГИУ). Показано, что после обработки приемистость нагнетательных скважин существенно увеличилась.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: разветвленная скважина, импульсно-волновое воздействие, гидроимпульсное устройство, резонансные частоты, приемистость

Розглянуто задачу про імпульсно-хвильовий вплив на розгалужену свердловину, викликаний відкриттям/закриттям засувки на її отворі. Показано, що в розгалужених свердловинах існують резонансні частоти, при яких величина тиску може на декілька порядків перевищувати амплітуду вихідного імпульсу. У відповідності з розрахованим резонансним режимом проведено обробку декількох нагнітальних свердловин на родовищах Омана за допомогою запатентованого гідроімпульсного пристрою (ГІП). Показано, що після обробки прийомистість нагнітальних свердловин суттєво збільшилась.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розгалужена свердловина, імпульсно-хвильовий вплив, гідроімпульсний пристрій, резонансні частоти, прийомистість

The problem on impulse-wave impact on a branched well due to opening/closing of the gate valve at its mouth is considered. It is shown that in branched wells the resonance frequencies exist for which the pressure value may exceed the the amplitude of the initial pulse by several orders of magnitude. According to calculated resonance regime, the several injection branched wells in the Oman fields were processed by means of a patented hydroimpulse device (HID). It is shown that the injectivity of treated wells has substantially increased.

KEY WORDS: branched well, the impulsive-wave impact, hydroimpulse device, resonance frequencies, injectivity

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшая научно-техническая проблема, возникающая в ходе эксплуатации месторождений, – наиболее полное извлечение нефти при обеспечении высоких темпов разработки. Существует множество методов воздействия на продуктивный пласт или его призабойную зону с целью увеличения коэффициента извлечения нефти. Наиболее эффективными среди них являются волновые методы. Волновое воздействие на продуктивный пласт способствует возникновению таких положительных явлений как разрушение и дезинтеграция колюматизирующего материала в поровых каналах, увеличение абсолютной и фазовой проницаемости нефти, снижение поверхностного и межфазного натяжений, улучшение реологических характери-

стик пластовых флюидов, разгазирование без дегазации нефти в пласте, ускорение капиллярной пропитки, раскрытие старых и образование новых микротрещин. В конечном итоге это приводит к увеличению темпа и полноты извлечения нефти.

По значению частоты генерируемого поля волновые методы разделяют на низкочастотные (до 1 кГц) и высокочастотные (свыше 1 кГц) [1]. Наибольший охват достигается при воздействии на пласт низкочастотными упругими волнами вследствие их незначительного затухания в геологической среде. Как показывают теория распространения упругих волн в поглощающих средах и практика применения низкочастотного волнового воздействия, в этих случаях радиус охваченной зоны зачастую превышает сотни и даже тысячи метров. В то же время при высокочастотном воздействии

охватывается только очень небольшая околоскважинная зона пласта [2].

Испытания, проведенные в Национальной лаборатории Лос-Аламоса в рамках проекта изучения основных принципов вибрационного воздействия “Сейсмическая интенсификация для увеличения добычи из нефтяных месторождений” [3], показали, что возбуждение с частотой 100 Гц и менее могло сильно влиять на двухфазное движение флюидов как в установившемся режиме, так и в условиях смоделированного заводнения. В результате этих исследований установлено, что в большинстве скважин после вибровоздействия отмечается быстрый рост их дебита и приемистости с последующим их снижением в течение (6...8) месяцев. В других скважинах дебит и приемистость растут медленно в течение (5...8) месяцев, а затем быстро снижаются до первоначальных уровней. В отдельных случаях закономерности в динамике дебита и приемистости не наблюдались.

В работе [4] показано, что упругая деформация твердых пород оказывает положительное влияние на движение флюидов в пористых средах, если частотный спектр возмущающего сигнала находится в пределах определенного диапазона. В этом случае добычу нефти можно интенсифицировать, применяя гармоническое возмущение оптимальных частот при совместимых условиях. Оптимальной частотой для интенсификации притока считается естественная или резонансная частота [5]. Есть мнение, что оптимальная частота для конкретной горной породы связана с размером поровых отверстий и гранул.

Одной из наиболее распространенных при описании физики низкочастотного волнового воздействия и наблюдаемых при этом эффектов является гипотеза, основанная на математической модели В. Н. Николаевского [11]. В ней предполагается, что геофизическая среда фильтрует любой сейсмический сигнал, выделяя из него узкую часть спектра, соответствующую доминантной (собственной) частоте колебаний среды. Таким образом, система “геофизическая среда – излучатель” переходит в режим резонанса с возникновением автоколебаний.

А. М. Свалов и А. Я. Хавкин в своих работах [6, 7, 10] провели анализ механизма возбуждения автоколебаний в залежи импульсным воздействием на пласт упругими волнами низкой частоты. По мнению авторов, в процессе такого воздействия сказывается существенное влияние на участки горной породы с максимальной концентрацией напряжений, которые могут располагаться как в пределах продуктивного пласта, так и в окружа-

ющем массиве. Заметим, что для того, чтобы инициировать масштабное перераспределение напряжений и выделение накопленной упругой энергии горного массива, приводящее к возникновению автоколебаний, достаточно осуществлять периодическое локальное импульсное воздействие. Вследствие изменения напряженного состояния пласта происходит его дополнительное сжатие, рост порового давления и интенсификация фильтрационных процессов в области разгрузки. При этом дополнительное сжатие происходит не за счет энергии, привносимой в пласт извне, а за счет энергии, накопленной в горном массиве.

Согласно новой ротационной гипотезе формирования структур, в земной коре [8, 9], в Институте горного дела СО РАН разработана концепция [10, 12, 13], в рамках которой геофизическая среда представляется состоящей из геоблоков различных размеров, разделенных системой трещин, заполненной продуктами облитерации и пластовыми флюидами. При проведении волнового воздействия на доминантной частоте возникает резонанс определенных геоблоков [11]. Объемная плотность энергии резонансных колебаний превышает объемную плотность подводимого сейсмического излучения, причем источником избыточной энергии служит напряженно-деформированное состояние горного массива. В результате высвобождения избыточной энергии при резонансном воздействии происходит перестройка структуры коллектора, фильтрационных каналов, и в процесс перераспределения флюидов вовлекаются окружающие участки пласта. Одновременно происходит дробление геоблоков на более мелкие с высвобождением концентрированной энергии в виде мощного ультразвукового излучения. Похожую гипотезу выдвигают авторы работы [14], полагая, что низкочастотное сейсмическое излучение при прохождении в горном массиве порождает вторичное высокочастотное излучение вплоть до ультразвукового, что описывается в [14] как эволюционное преобразование. Рассмотренные модели возбуждения резонансных автоколебаний в геофизической среде вполне удовлетворительно объясняют наличие положительного эффекта от волнового воздействия в отдаленных от возмущающей скважины зонах за счет генерации распределенного по площади вторичного высокоэнергетического излучения.

По способу преобразования первичной энергии в энергию колебаний породы источники упругих волн подразделяются на механические, гидравлические, газопневматические, электромеханические и др. [1]. Волновое воздействие может осуществ-

ляются с помощью погружных источников, расположенных в непосредственной близости от целевого пласта (пластовой системы) или на земной поверхности в районе устья скважины, а также с применением специальных массивных вибрационных и импульсных источников. При этом особое значение имеет энергоэффективность процесса. Доля энергетической составляющей в себестоимости проведения технологической операции может достигать 60 %, поэтому при выборе способа обработки продуктивного пласта необходимо особое внимание уделять энергетической и экономической эффективности применяемого метода.

Поверхностные механические источники, обладают, низким к. п. д., имеют высокую стоимость, нуждаются в трудоемком монтаже. Проведение подобных работ существенно зависит от климатических условий и осложняется тем, что промыслы в целом не подготовлены к ним.

Существующие скважинные способы имеют низкие энергетические показатели воздействия на пласт, обеспечивающие в основном обработку только призабойной зоны скважины. Кроме того, ограничена кратность (длительность) таких воздействий, отсутствует возможность применять их в горизонтальных многоствольных скважинах.

С целью достижения максимальной эффективности воздействия на пласт и его призабойную зону наиболее целесообразно использовать импульсно-волновые методы с формированием ударных импульсов во флюидозаполненной скважине, начиная с устья скважины, с использованием специальных устройств – импульсных генераторов. В этом случае гидроимпульсы давления, действуя с заданной частотой повторения на окружающую скважину слоистую среду, возбуждают в пласте волновые пакеты затухающих упругих колебаний определенной длительности.

Длительность волновых пакетов и максимальная амплитуда колебаний в их пределах, определяются как акустическими характеристиками пласта (добротностью, скоростью распространения и коэффициентом поглощения упругих колебаний, акустическим сопротивлением), так и параметрами последовательности гидроимпульсов давления (амплитудой и частотой повторения). При увеличении частоты повторения скважность последовательности пакетов – отношение периода повторения к длительности пакета – будет уменьшаться [15].

Технология импульсно-волнового воздействия с использованием устьевых генераторов выгодно отличается от других волновых методов, а также альтернативных подходов именно в плане энерге-

тических затрат. Ее применение не требует высокопроизводительного оборудования и дорогостоящей техники. Более того, первоначальное воздействие возможно увеличить в (4...5) раз при обработке требуемого участка пласта, что значительно сокращает потребности в мощности приводящего агрегата [16].

При импульсно-волновом воздействии на скважину энергетические затраты минимизируются, поскольку не применяются такие энергоемкие технологии, как гидроразрыв пласта, термогазовый способ и т. п. При организации развития сети трещин в прикважинной зоне пласта за счет гидродуаров используется минимальное количество техники, нет необходимости задействовать погружное оборудование. Оценочные расчеты подтверждают возможность эффективной передачи энергии импульсно-волновым способом от устья скважины в систему трещин прикважинной 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 [16]. В случае передачи ударной волны с поверхности скважинная жидкость, большую часть которой составляет вода, в силу высокой плотности и малой сжимаемости, является благоприятной средой для передачи перепадов давления на значительные расстояния. Металлические стенки скважины эффективно отражают волны давления, предотвращая рассеяние, и их энергия канализируется. Аналогичным образом передается световой импульс через оптоволоконный кабель. Раскачка массы скважинной жидкости способствует глубокому проникновению волны давления в пласт, размыву породы и эффективному извлечению загрязнений, закупоривающих трещины пласта. Волны сжатия 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.

Для воздействия на призабойные пласты (ПЗП) наиболее целесообразно применять гидравлические генераторы с частотой повторения импульсов давления (1...50) Гц, которые на расстояниях, превышающих 2 м от оси скважины, меньше поглощаются пластом. Для создания в пласте условий изменения процессов фильтрации на расстояниях не менее 100 м от скважинного генератора интенсивность колебаний на входе в пласт дол-

жна быть не менее 1.2 Вт/см². Как показывают расчеты, она может быть достигнута при перепаде давления на гидрогенераторе порядка 4 МПа и расходе рабочей жидкости 340 л/мин [17].

Описанные методы волнового и импульсно-волнового воздействия на пласт применяются, в основном, для вертикальных скважин. В настоящее же время для интенсификации добычи нефти и увеличения зоны охвата широко распространено бурение в нефтеносном пласте систем горизонтальных разветвленных добывающих и нагнетательных скважин длиной в несколько километров. При этом скважины располагаются таким образом, что между каждыми двумя ответвлениями добывающей скважины находится ответвление нагнетательной. При закачке воды в нагнетательную скважину происходит вытеснение нефти в добывающие ответвления.

По мере добычи приемистость нагнетательных и добывающих скважин уменьшается за счет загрязнения различными колматантами. В связи с этим весьма актуальна задача очистки призабойной зоны горизонтальных скважин. Обычно это делается с помощью колтюбинговой установки, которая позволяет промыть загрязненную поверхность промывающей жидкостью, однако это – достаточно долгий и дорогостоящий процесс. Значительно дешевле обходится очистка призабойной зоны с помощью виброакустических воздействий. Но и здесь есть свои проблемы, связанные с доставкой энергии в ответвления горизонтальных скважин. В работе [18] показано, что для увеличения проницаемости призабойной зоны протяженных разветвленных горизонтальных скважин наиболее эффективен импульсно-волновой метод создания гидроудара на устье скважины при резком открытии/закрытии задвижки на фонтанной арматуре. Установлено, что при определенных частотах внешнего воздействия в разветвленной скважине возможно возникновение резонанса, при котором величина результирующего давления в десятки и сотни раз превышает амплитуду исходного импульса.

Ниже будет рассмотрена более общая, чем в [18], трехмерная задача импульсно-волнового воздействия на разветвленную скважину, которую мы будем моделировать разветвленным волноводом радиуса a_j с ответвлениями радиуса a_{2j} (рис. 1).

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В соответствии с принятой концепцией разветвленный волновод разбивается на отдельные участки (рис. 1), в каждом из которых движение жид-

кости описывается волновым уравнением [19, 20] относительно давления P_j :

$$\frac{1}{r_j} \frac{\partial}{\partial r_j} \left(r_j \frac{\partial P_j}{\partial r_j} \right) + \frac{1}{r_j^2} \frac{\partial^2 P_j}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 P_j}{\partial x^2} - \frac{1}{c_j^2} \frac{\partial^2 P_j}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

$$r_j \in [0, a_j], \quad \theta \in [0, 2\pi],$$

$$c_j = \frac{c_0}{\sqrt{1 + \frac{E_{жк} D}{E_{ст} \delta}}}.$$

Здесь c_j – скорость распространения ударной волны в волноводе; c_0 – скорость распространения звука в жидкости; $E_{жк}$ и $E_{ст}$ – модули сжимаемости жидкости и стенок трубопровода; D и δ – диаметр и толщина стенки трубопровода; P_j – давление ударной волны в трубопроводе; t – время; j – номер участка волновода. Если участок скважины не обсаженный, то $\delta \rightarrow \infty$ и $c_j = c_0$.

На каждом переходе от одного участка к другому при $x = x_{2j}$ ($j = \overline{1, N-1}$), выполняются условия сопряжения, выражающие равенство давлений и расходов:

$$(P_{2j-1})_{x=x_{2j}} = (P_{2j})_{x=x_{2j}},$$

$$(P_{2j-1})_{x=x_{2j}} = (P_{2j})_{x=x_{2j+1}},$$

$$\left(\iint_{S_{2j-1}} \frac{\partial P_{2j-1}}{\partial x} \right)_{x=x_{2j}} = \left(\iint_{S_{2j}} \frac{\partial P_{2j}}{\partial x} \right)_{x=x_{2j}} + \left(\iint_{S_{2j+1}} \frac{\partial P_{2j+1}}{\partial x} \right)_{x=x_{2j}}. \quad (2)$$

На торцах разветвлений x_{2j+1} ($j = \overline{1, N-1}$) и в конце трубопровода $x = x_{2N}$ выполняются условия равенства нулю продольной составляющей скорости:

$$\frac{\partial P_j}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

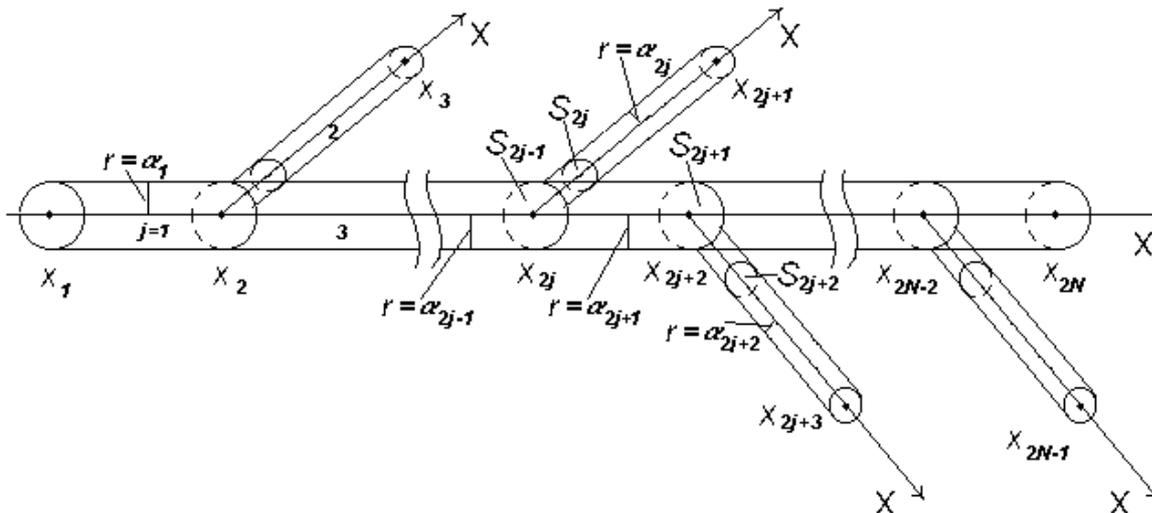


Рис. 1. Геометрия разветвленного волновода

а на поверхности разветвлений и трубопровода при $r = a_j$ ($j = 1, 2N - 1$) – радиальной составляющей скорости [20, 21]:

$$\frac{\partial P_j}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

В начальный момент времени к левому концу разветвленной скважины приложена последовательность импульсов давления

$$P_1(r, \theta, t) = p_0 f(t) p(r, \theta), \quad (5)$$

где $f(t)$ – некоторая периодическая функция, которую можно представить в виде разложения в ряд Фурье [22]:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n e^{in\omega t}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Решение уравнения (1) на каждом отдельном участке будем строить в следующем виде:

$$P_j = \sum_{n=-\infty}^{\infty} p_j^n(r, \theta, x) e^{in\omega t}. \quad (6)$$

Подставив выражение (6) в формулу (1), получим для каждого j -го участка волновода уравнение Гельмгольца относительно $p_j^n(r, \theta, x)$ в цилиндрических координатах:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_j^n}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p_j^n}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 p_j^n}{\partial x^2} + \frac{(n\omega)^2}{c_j^2} p_j^n = 0. \quad (7)$$

Если искомые функции представить в виде [20] $p_j^n = R_j^n(r) \Theta_j^n(\theta) X_j^n(x)$, то уравнения Гемгольца (7)

расщепляются на три обыкновенных дифференциальных уравнения второго порядка:

$$\frac{d^2 \Theta_j^n}{d\theta^2} + m^2 \Theta_j^n = 0,$$

$$\frac{d^2 X_j^n}{dx^2} + (k_j^n)^2 X_j^n = 0, \quad (8)$$

$$\frac{d^2 R_j^n}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR_j^n}{dr} + \left((\lambda_j^n)^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) R_j^n = 0,$$

где $(k_j^n)^2 = (n\omega)^2/c_j^2 - (\lambda_j^n)^2$, $m = 0, 1, \dots, \infty$. Первое из них имеет решение в виде гармонической функции $e^{im\theta}$ при целочисленных значениях параметра m . Решение второго уравнения ищем в виде

$$X_j^n = A_j^n e^{-ik_j^n x} + B_j^n e^{ik_j^n x},$$

где A_j^n, B_j^n определяются из граничных условий (2), (3) и (5). Оно представляет собой сумму двух волн, распространяющихся вдоль оси x волновода навстречу друг другу, которые могут существовать только для частот, удовлетворяющих условию $\omega > c_j \lambda_j^n/n$ [19, 21]. Последнее соотношение из (8) при целочисленных значениях параметра m приводится к уравнению Бесселя m -го порядка относительно переменной $\lambda_j^n r$. Его частное решение с учетом условия регулярности при $r=0$ можно представить в виде функции Бесселя: $R_j^n = J_m(\lambda_j^n r)$. Используя условия (4), получаем дисперсионное уравнение $J'_m(\lambda_j^n a_j) = 0$, из которого определяем первый действительный корень ($\lambda_j^n = \lambda_{j1}^n$) для каждого участка разветвленного волновода.

Таким образом, общее решение задачи, следующее из выражения (6), можно записать в виде

$$P_j = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} (A_j^n e^{-ik_j^n x} + B_j^n e^{ik_j^n x}) \times J_m(\lambda_{j1}^n r) e^{im\theta} e^{in\omega t} \quad (9)$$

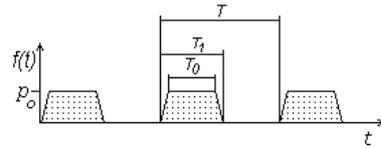


Рис. 2. Форма приложенного импульса

2. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим задачу гидроимпульсного воздействия на разветвленную скважину, моделируемую разветвленным волноводом с ответвлениями радиуса a_j (см. рис. 1). К левому концу разветвленной скважины приложена последовательность симметричных трапецеидальных во времени t импульсов давления [22] с периодом T (рис. 2):

$$f(t) = \frac{b_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos n\omega t.$$

Здесь

$$b_n = \frac{T_0 - T_1}{T} s\left(\frac{n(T_0 - T_1)}{T}\right) s\left(\frac{n(T_0 + T_1)}{T}\right),$$

$$s(q) = \frac{\sin \pi q}{\pi q}.$$

Указанному случаю соответствует частное решение (9) в котором $m=0$ и $l=0$, т. е. $R_j^n = J_0(\lambda_{j1}^n r)$, где $\lambda_{j1}^n = 0$ – первый (наименьший) действительный корень уравнения $J_0'(\lambda_{j1}^n a_j) = 0$ [19, 21]. По сути, проблема сводится к рассмотренной в [18] задаче при замене частотного множителя для каждого члена разложения (6) на ωn .

На рис. 3 представлена схема вертикальной скважины диаметром $D=0.168$ м и глубиной 3000 м, проперфорированной на участке от 1901 до 1909 м каналами с шагом 0.1 м, диаметром $d=0.01$ м и длиной $l=1$ м. Предполагается, что к левому концу скважины приложено импульсное давление, по закону, соответствующему рис. 2 при $P_0=1$ и $T_1-T_0=0.08$.

По построенному решению (9) рассчитано распределение давления вдоль скважины и каналов перфораций в зависимости от периода следования импульсов. Анализ численных данных показал, что в такой скважине образуется система стоячих волн, существенно зависящая от частоты повторения возмущений на ее устье. Наиболее интересен случай, когда отраженная от торцов ответвлений волна переотражается также и от закрытой в момент ее прихода задвижки на устье скважины. В такой ситуации происходит как бы накачка

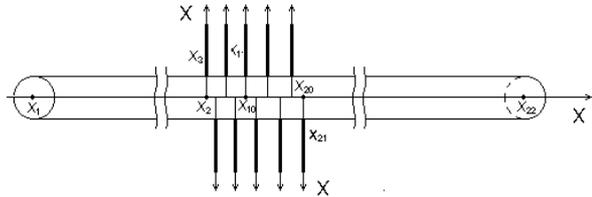


Рис. 3. Схема вертикальной скважины с перфорированными каналами

энергии в скважину. Это может привести к увеличению амплитуды стоячей волны в десятки и сотни раз.

На рис. 4 представлен график максимального резонансного давления в вертикальной скважине (см. рис. 3) в зависимости от периода следования импульсов. Из него видно, что в рассматриваемом диапазоне изменения периодов следования импульсов существует множество резонансных точек, где величина давления в скважине существенно превышает амплитуду исходного импульса, однако наиболее перспективными для реализации являются периоды в диапазонах (2.38...2.40), (2.90...2.95) и (3.7...3.8) с. Такое “неравноправие” различных значений T связано с тем, что время срабатывания задвижки в устьевом генераторе импульсов составляет порядка 0.01 с и при реальной обработке скважины трудно с необходимой точностью сгенерировать период следования импульсов, если ширина резонансного максимума оказывается меньше, чем 0.02 с.

На рис. 5 представлено распределение давления внутри скважины и внутри каналов перфорации при $T=3.76$ с и $T_1-T_0=0.08$ с. Из графика следует, что при резонансных значениях периода следования импульсов амплитуда давления внутри скважины и каналов перфорации возрастает в сотни раз по сравнению с амплитудой генерируемого импульса. Основное влияние на появление резонансов оказывают конструкция и параметры скважины. Влияние каналов перфорации выражается только в сдвиге резонансных периодов в ту или иную сторону.

Однако наиболее интересны результаты гидроимпульсного воздействия на горизонтальные

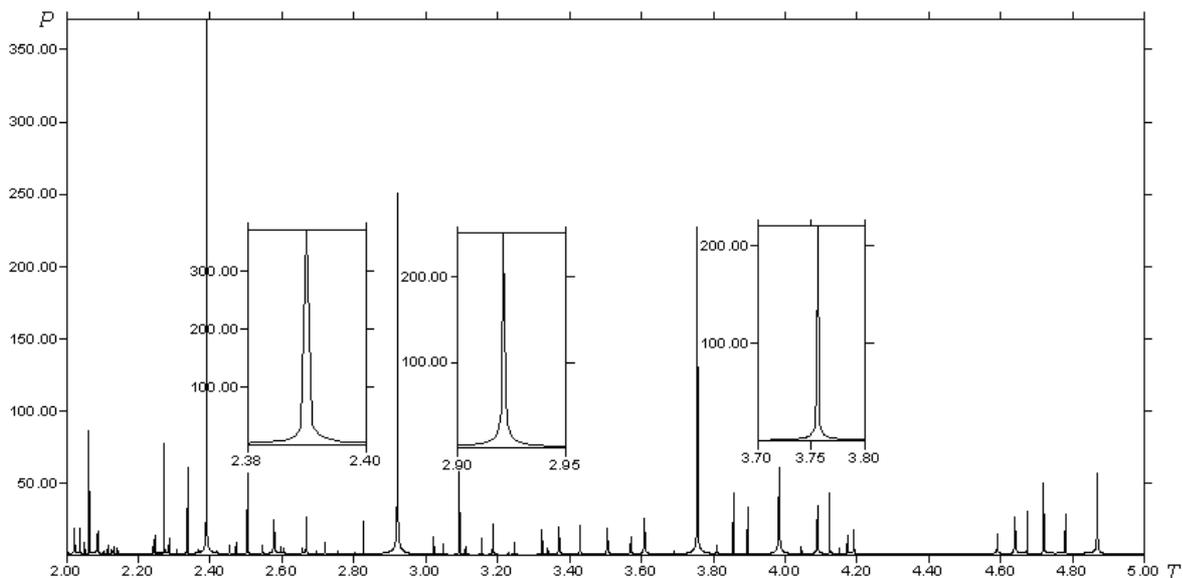


Рис. 4. Резонансные периоды генерируемых импульсов для вертикальной перфорированной скважины

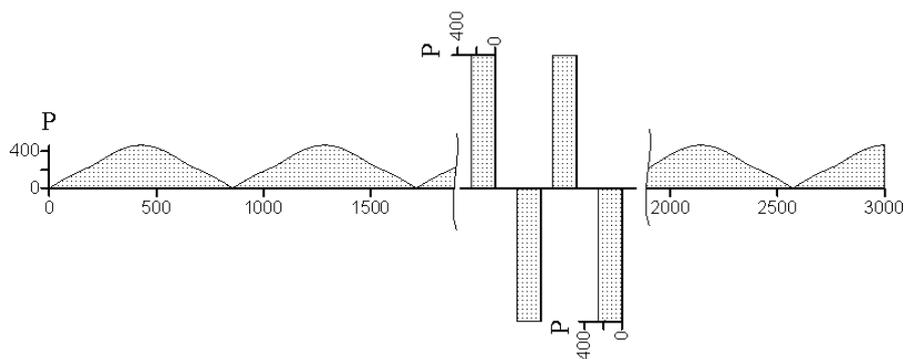


Рис. 5. Распределение эпюр давления в вертикальной перфорированной скважине при резонансном периоде $T = 3.76$ с

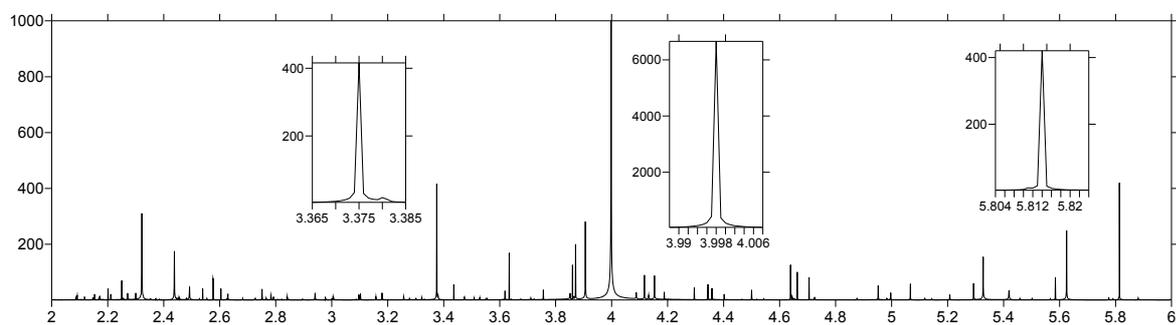


Рис. 6. Резонансные периоды для разветвленной скважины проекта SR-115:
 а – ширина резонанса для $T = 3.375$ с, б – ширина резонанса для $T = 3.998$ с, в – ширина резонанса для $T = 5.815$ с

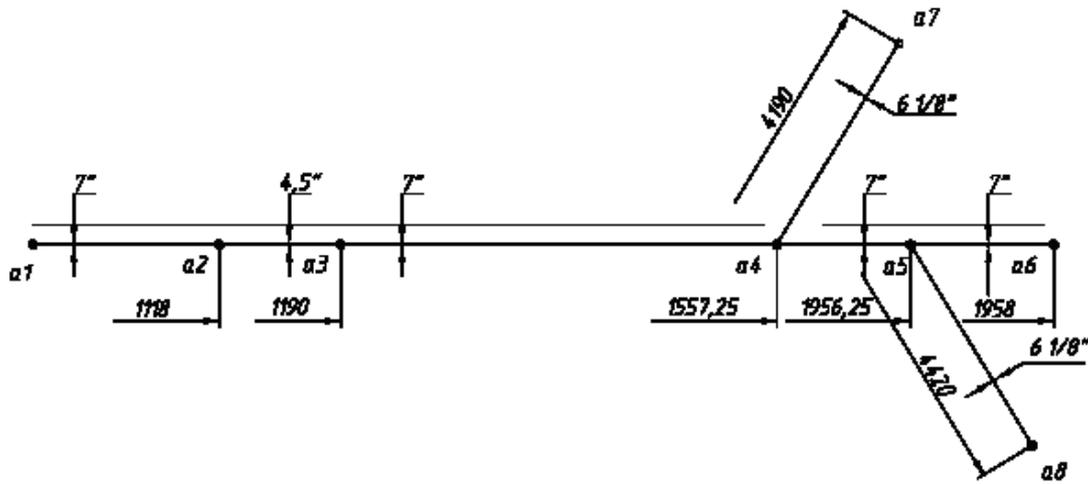


Рис. 7. Расчетная схема разветвленной горизонтальной скважины проекта SR-115

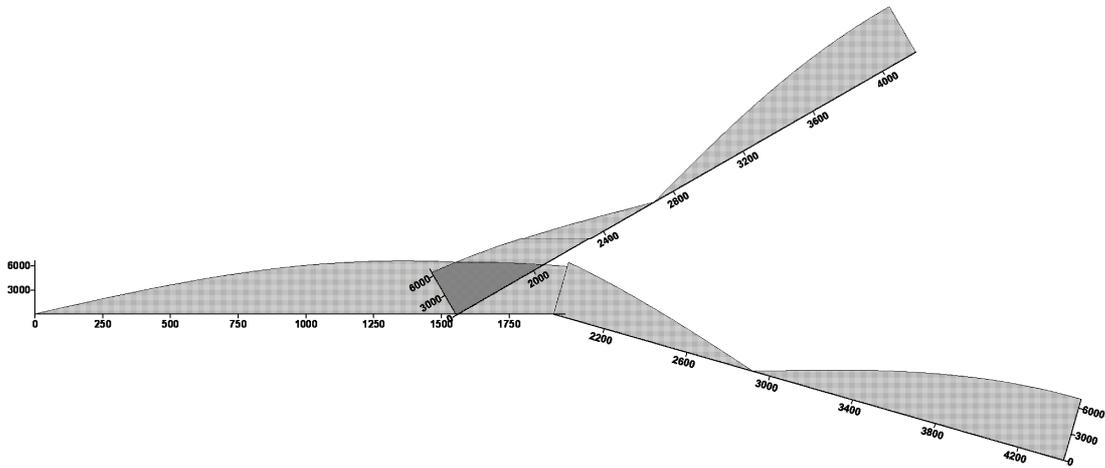


Рис. 8. Распределение эпур давления в горизонтальной разветвленной скважине при резонансном периоде $T=3.998$ с



Рис. 9. Процесс обработки нагнетательной скважины № 115 с помощью ГИУ (24.04.2014) на месторождении Saih Rawl – Petroleum Development Oman (PDO). Истечение жидкости при открытой задвижке

разветвленные скважины. На рис. 6 представлены графики резонансных давлений, которые возникают внутри разветвленной горизонтальной скважины проекта SR-115 (рис. 7). Здесь, как и в случае вертикальной скважины, образуется система стоячих волн. Численные расчеты показали, что при определенных периодах следования импульсов волна распространяется преимущественно по основной скважине и практически не проникает в некоторые из ответвлений. Как и следовало ожидать, это происходит тогда, когда узел стоячей волны находится вблизи ответвления боковой скважины. При этом максимальное давление вдоль скважины не превышает (0.5...0.7) от амплитуды начального импульса волны, генерируемой на устье. Возможны случаи, когда акустические возмущения проникают лишь в одно или два ответвления, в то время как в остальных они практически отсутствуют.

По аналогии со случаем вертикальной скважины, наиболее интересен тот случай, когда отраженная от торцов ответвлений волна переотражается также и от закрытой в этот момент времени задвижки на устье скважины. Здесь опять происходит закачка энергии в скважину, существенно повышающая амплитуду стоячей волны. Как следует из численных данных (см. также рис. 6), ширина большинства резонансных максимумов составляет (0.002...0.01) с. В то же время, как уже отмечалось, технически реализовать время закрытия задвижки быстрее, чем за 0.01 с, весьма затруднительно. Поэтому наибольший практический интерес представляют значения резонансных периодов с шириной, большей 0.01 с.

На рис. 8 представлено распределение эпюр давления внутри разветвленной скважины проекта SR-115 при $T=3.998$ с. Из графика следует, что узел стоячей волны в этом случае проходит через середину ответвления горизонтальной скважины, а ее амплитуда может увеличиваться в тысячи раз по сравнению с амплитудой генерируемого импульса. Естественно, что из-за ограниченной точности задания резонансного периода на практике этого достигнуть не удастся, однако следует помнить, что возрастание амплитуды стоячей волны даже в несколько раз существенно повышает эффективность обработки призабойной зоны.

Расчитанный резонансный режим генерации импульсов был использован при обработке призабойной зоны нагнетательных скважин проектов SR-115 и SR-94 в рамках опытно-промышленных исследований на одном из месторождений Омана. Обработка проводилась с помощью устьевого генератора импульсов (ГИУ) [23–25]. Насо-

ным агрегатом в пласт закачивалось определенное количество жидкости и создавалось избыточное давление в (40...60) атм. Затем за счет резкого открытия/закрытия с заданным периодом задвижки на устье скважины (рис. 9) генерировались цуг трапецеидальных импульсов давления (см. рис. 2), которые распространялись в заполняющей скважину жидкости. Поскольку при открытии задвижки часть закачанной жидкости выливается, а часть фильтруется в пласт, на практике такая последовательность импульсов имеет монотонно убывающую амплитуду, причем степень убывания зависит от длительности импульсов и коэффициента фильтрации. В случае обработки скважины в резонансном режиме нарастание амплитуды стоячей волны должно компенсировать затухание импульсов за счет выливания жидкости из скважины и ее фильтрации в пласт.

На рис. 10 представлена реальная запись изменения давления на устье скважины проекта SR-115 при ее обработке с периодом 4 с. Из графика следует, что амплитуда давления в начальные моменты времени растет по линейному закону, т. е., как и было предсказано теоретически, идет накопление энергии за счет переотраженных волн.

Для задания алгоритма выхода генератора на заданный режим работы разработана система управления ГИУ, которая посредством контроллера позволяет дистанционно задавать выбранные значения параметров работы и корректировать их в процессе обработки. Это дает возможность генерировать последовательности импульсов давления с необходимым периодом следования в пределах ширины резонансного максимума. Контроль процесса обработки осуществляется путем замеров давления в линии следования импульсов. Для этого используется система контроля и измерения, включающая автономный устьевой манометр-термометр, тензодатчик давления и акустический датчик. Они предназначены для контроля процесса обработки, состояния ПЗП скважины и параметров импульсов давления, создаваемых устройством с резонансным периодом. При этом фиксируются отраженные от скважины сигналы. Через контроллер они подаются на компьютер, где путем сравнения расчетных и фактических значений проводится анализ и корректировка выбранных режимов, а также происходит запись всего процесса обработки.

Для оценки эффективности воздействия проводится контроль изменения давления в закрытой скважине на этапах до начала обработки, в процессе обработки и после нее. По характеру изменения кривой падения давления можно судить об

изменении состояния ПЗП скважины и, тем самым, об эффективности обработки [26]. На рис. 11 представлены кривые падения давления на разветвленной горизонтальной нагнетательной скважине проекта SR-94 до и после обработки с помощью ГИУ. Из графика следует, что после обработки приемистость скважины увеличилась почти в три раза. Аналогичные результаты, хотя и с несколько менее выраженным эффектом, наблюдались при резонансной обработке других скважин.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена задача импульсно-волнового воздействия на разветвленную скважину, вызванного открытием/закрытием задвижки на ее устье. Показано, что в разветвленных скважинах существуют резонансные частоты при которых величина давления может на несколько порядков превышать амплитуду исходного импульса. В соответствии с рассчитанным резонансным режимом проведена обработка нескольких нагнетательных разветвленных скважин на месторождениях Омана с помощью запатентованного гидроимпульсного устройства (ГИУ). Показано, что после обработки приемистость нагнетательных скважин существенно увеличилась.

1. Дыбленко В. П. Волновые методы воздействия на нефтяные пласты с трудно извлекаемыми запасами. Обзор и классификация. – М.: ВНИИОЭНГ, 2008. – 300 с.
2. Кузнецов О. Л., Симкин Э. М., Чилингар Д. Физические основы вибрационного и акустического воздействий на нефтегазовые пласты. – М.: Мир, 2001. – 260 с.
3. Sharma A., Roberts P. M. Seismic stimulation of oil production in mature reservoirs // AAPG Ann. Convent., Ext. Abstr. – 1998. – 2. – P. A591.
4. Pan Y. Reservoir analysis using inter media tefrequency excitation / PhD Diss. – Stanford, CA: Stanford Univ., 1999. – 162 p.
5. Beresnev L. A., Johnson P. A. Elastic wave stimulation of oil production: A review of methods and results // Geophysics. – 1994. – 59, № 6. – P. 1000–1017.
6. Свалов А. М. О механизме волнового воздействия на продуктивные пласты // Нефт. хоз. – 1996. – № 7. – С. 27–30.
7. Свалов А. М. Научно-методическое обоснование технологий ударно-волнового воздействия на продуктивные пласты // Нефт. хоз. – 1999. – № 11. – С. 26–27.
8. Тяпкин К. Ф. Новая ротационная гипотеза формирования структур в земной коре // Геол. ж. – 1974. – № 4. – С. 3–16.

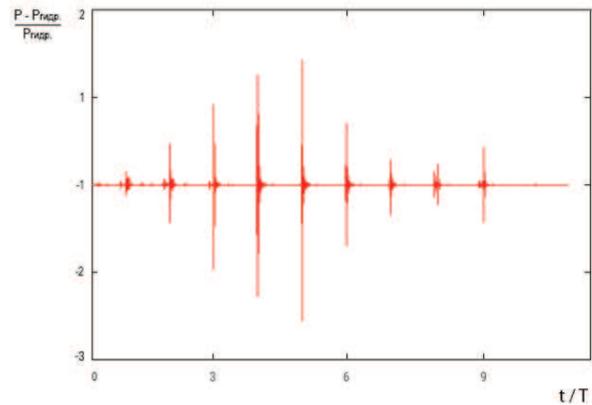


Рис. 10. Запись акустического датчика при проведении обработки нагнетательной скважины № 115 при работе ГИУ (24.04.2014). Месторождение Saih Rawl – Petroleum Development Oman (PDO)

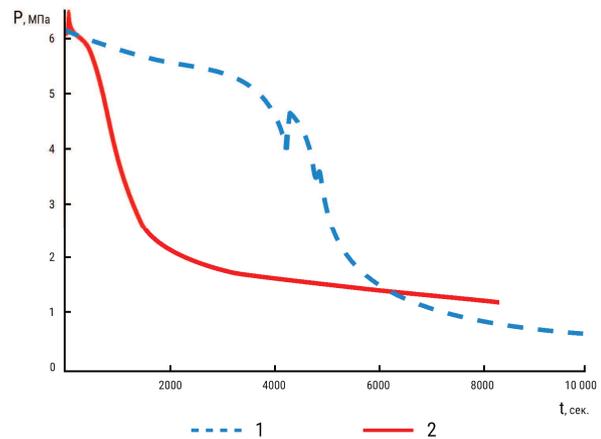


Рис. 11. Сводный график кривых падения давления (КПД) на нагнетательной скважине проекта SR-94 месторождения Saih Rawl – Petroleum Development Oman (PDO):

1 – до проведения обработки (16.06.2014),
2 – после проведения обработки (20.06.2014)

9. Тяпкин К. Ф., Довбнич М. М. Новая ротационная гипотеза структурообразования и ее геолого-математическое обоснование. – Донецк: Ноулидж, 2009. – 342 с.
10. Свалов А. М., Хавкин А. Я. Особенности возбуждения автоколебательных процессов при разработке нефтегазовых залежей // Геол., геофиз. разраб. нефт. месторожд. – 1998. – № 2. – С. 36–39.
11. Николаевский В. Н. Механизм вибровоздействия на нефтеотдачу месторождения и доминантные частоты // Докл. АН СССР. – 1989. – 307, № 3. – С. 570–575.
12. Симонов Б. Ф., Опарин В. Н., Канискин Н. А., Чередников Е. Н., Кадышев А. И., Масленников В. В. Вибросейсмическое воздействие на нефтяные пласты с земной поверхности // Нефт. хоз. – 2000. – № 5. – С. 23–27.

13. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа. Часть II: Методика экспериментов и основные результаты физического моделирования // ФТПРПИ.– 1996.– № 4.– С. 3–39.
14. Крылов А. Л., Мазур Н. Г., Николаевский В. Н., Эль Г.А. Градиентно-согласованная нелинейная модель генерации ультразвука при распространении сейсмических волн // Прикл. мат. мех.– 1993.– № 6.– С. 100–109.
15. Браммер Ю. А., Пащук И. Н. Импульсная техника.– М.: Высшая школа, 1965.– 284 с.
16. Николаев Н. И., Шипулин А. В., Купавых К. С. Повышение энергоэффективности процесса освоения скважин // Науч.-тех. ведомости Санкт-Петербург. гос. политех. ун-та.– 2015.– **2(219)**.– С. 48–57.
17. Бажалук Я. М., Карпаш О. М., Клымышин Я. Д., Гутак А. И., Худин Н. В. Увеличение отбора нефти путем воздействия на пласты пакетами упругих колебаний // Нефтегаз. дело.– 2012.– № 3.– С. 185–198.
18. Гончаренко Т. Б., Яковлев В. В., Бондарь В. В. Исследования виброакустического воздействия на призабойную зону пласта // Акуст. вісн.– 2013–2014.– **16**, № 4.– С. 3–9.
19. Исакович М. А. Общая акустика.– М.: Наука, 1973.– 495 с.
20. Лепендин Л. Ф. Акустика.– М.: Высшая школа, 1978.– 448 с.
21. Ганиев О. Р., Ганиев Р. Ф., Украинский Л. Е. Резонансная макро- и микромеханика нефтяного пласта. Интенсификация добычи нефти и повышения нефтеотдачи.– М./Ижевск: Ин-т компьют. иссл., 2014.– 256 с.
22. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров.– М.: Наука, 1968.– 720 с.
23. Верба Ю. В., Здольник Г. П., Нікітін В. О., Верба А. Ю. Гирловий генератор імпульсів. № а2015, 08972 (112723 С2, МПК Е21В 34/10, Е21В 43/25, Е21В 28/00) // Пат. UA.– 10.10.2016.– Бюл.№ 19.– С. 10.
24. СОУ 11.1-00135390-042:2007. Технологія впливу на привибійну зону нафтових, газоконденсатних, газових та нагнітальних свердловин імпульсно-хвильовою дією.– К.: ВАТ “Укрнафта”, 2007.– 26 с.
25. ТУ У 29.5-30785395-024:2007. Генератор імпульсів гирловий.– К.: ТОВ “Криптон-М”, 2007.– 31 с.
26. Здольник Г. П., Верба Ю. В., Зазуляк О. М. Спосіб роботи насосно-ежекторної свердловинної імпульсної установки. № а2003, 087992 (68022 С2, МПК F21В 34/10, Е21В 43/25, Е21В 28/00) // Пат. UA.– 17.07.2006.– Бюл. № 7.– С. 10.