

*tive Model for Soft Rock: dis. ... for the degree of Doctor of Philosophy. – Blacksburg, Virginia, 2004.*

10. Popov S.N. Vliyaniye mekhanokhimicheskikh effektov na pronitsaemost' treshchin pri modelirovaniy tsiklicheskoj zakachki vody v karbonatnye kollektory // *Neft. khoz-vo.* – 2015. – № 8. – С. 77–79.

11. Popov S.N. Geokhimicheskoe vzaimodeystvie plastovykh i

*nagnetaemykh vod s treshchinovatyimi karbonatnymi kollektorami // Neft. khoz-vo.* – 2013. – № 5. – С. 76–79.

12. Popov S.N. Nekotorye osobennosti vliyaniya vzaimodeystviya karbonatnykh kollektorov, plastovoy i nagnetaemoy vody na fil'tratsionno-emkostnye i fiziko-mekhanicheskie svoystva porod // *Neftpromyslovoe delo.* – М.: ОАО "ВНИОЕНГ", 2013. – № 5. – С. 25–28.

УДК 622.276.6

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ПАРОГРАВИТАЦИОННОГО ДРЕНАЖА ЗА СЧЕТ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТ

Я.И. Кравцов, Е.А. Марфин, А.А. Абдрашитов

(Казанский научный центр РАН)

### Введение

Увеличение извлекаемых запасов углеводородного сырья в условиях истощения нефтяных месторождений и сокращения объема прироста запасов за счет вновь открываемых месторождений может быть достигнуто за счет применения методов увеличения нефтеотдачи (МУН) пластов и вовлечения в эффективную разработку трудноизвлекаемых запасов нефти и ее альтернативы – природных битумов. Результаты проведенных исследований и анализ мировых тенденций свидетельствуют, что одним из наиболее эффективных направлений является использование интегрированных методов воздействия на продуктивные пласты [1–3]. Сущность такого подхода заключается в совмещении применяемых МУН с волновым воздействием [3–6], т. е. формировании поля упругих колебаний в пластах, подверженных другим методам воздействия.

Многочисленные исследования [7–12], проведенные как в лабораторных, так и промысловых условиях, свидетельствуют о том, что в поле упругих колебаний интенсифицируются многие процессы, протекающие в продуктивных пластах: увеличивается проницаемость продуктивного пласта, повышается эффективная теплопроводность, меняются реологические свойства пластовых флюидов, вовлекается в фильтрационный поток "зашемленная" нефть, меняется гистерезис смачивания и многие другие. В частности, в статье М. Manga с соавторами [8] исследуются изменения проницаемости пористых коллекторов при прохождении упругих волн, предлагаются различные механизмы этого явления. В работе В.И. Иванникова [9] акцентируется внимание специалистов на механизмы кольматации и декольматации нефтяных пластов и даются рекомендации по применению различных волновых воздействий на призабойную зону пласта для улучшения ее проницаемости. Барабанов В.Л. в работе [10] рассмотрел механизм сейсмического воздействия на нефтяные пласты с точки зрения фрактальности фильтрационных процессов. Муллакаев М.С. с соавторами [11] предлагают

технологии повышения продуктивности низкодебитных скважин за счет использования упругих волн высокой частоты – ультразвука.

В настоящее время разработка месторождений высоковязких нефтей невозможна без использования тепловых методов. К таким методам относят: закачку в пласт теплоносителей (пар, горячая вода, растворители), метод парогравитационного дренажа (SAGD) и др. [13–15]. Совмещение применяемых тепловых методов с воздействием на пласт упругими волнами может повысить эффективность процесса добычи и снизить себестоимость таких нефтей. Анализ результатов проведенных исследований [12, 16] позволяет сделать вывод о том, что главным фактором, влияющим на эффективность воздействия, является амплитуда колебаний в зоне протекающих процессов. К примеру, при совмещении виброволнового воздействия с внутрипластовым горением – это зона очага горения, при закачке пара такой зоной является граница раздела жидких фаз (нефть – пар). Целью настоящей работы является оценка перспектив совмещения парогравитационного дренажа с волновым воздействием.

### Сущность метода воздействия

Совмещение тепловых методов с волновым воздействием имеет определенные сдерживающие факторы. Один из них – технический, основанный на необходимости разработки надежных скважинных генераторов колебаний. Другой фактор – режимный, т. е. для обеспечения эффективности воздействия необходим определенный режим воздействия (выбор амплитудно-частотных характеристик скважинных генераторов). Известен способ тепловолнового воздействия на продуктивный пласт, включающий одновременное тепловое и волновое воздействие за счет нагнетания в скважину теплоносителя через проточный излучатель колебаний давления, установленный в скважине [17]. Для повышения текучести высоковязкой нефти по одноустьевой горизонтальной скважине в пласт нагнетают водяной пар. Генерация колебаний давления осуществляется на частоте, соответствующей

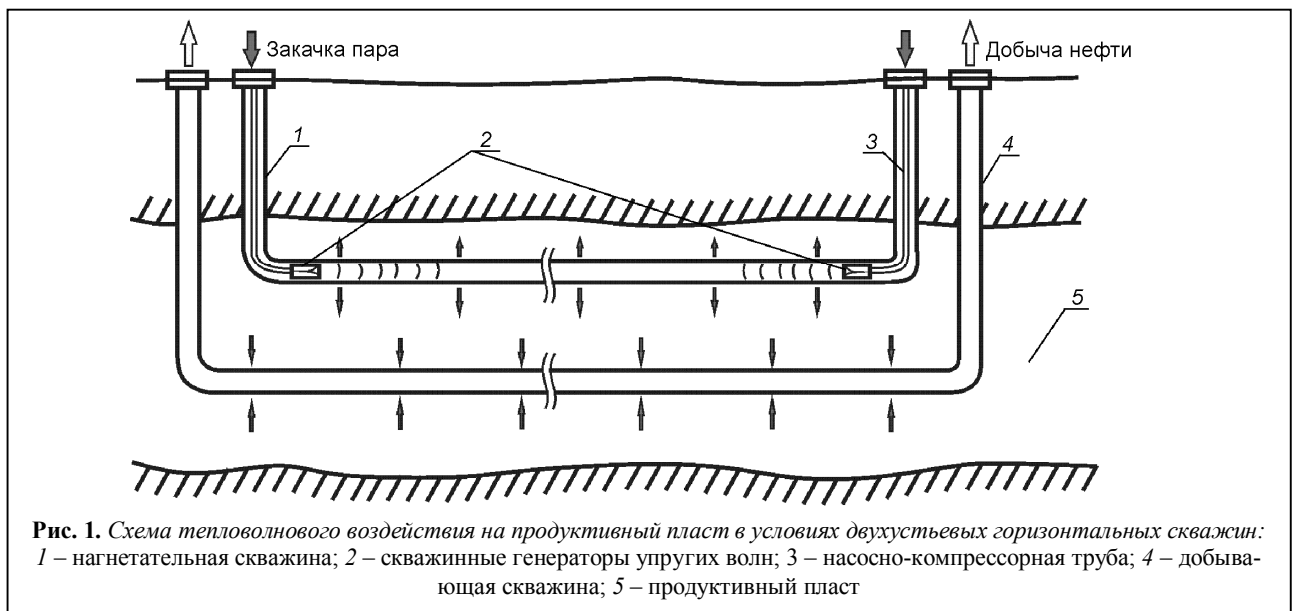
ющей частоте собственных колебаний продуктивного пласта. Недостатком этого способа является незначительная величина области, охватываемой воздействием волнового поля, ограниченной непосредственной близостью к источнику колебаний давления. Такой подход требует проведения предварительных промысловых исследований частотных характеристик пласта.

В качестве объекта исследования рассмотрим технологию парогравитационного дренажа (SAGD), реализуемую на объектах Ашалчинского месторождения ОАО "Татнефть" [15]. Задача исследования заключается в разработке способа совмещения этой технологии с волновым воздействием и выборе оптимального режима воздействия, обеспечивающего максимальную интенсивность колебаний в продуктивном пласте.

Предложенный авторами изобретения [15] способ добычи высоковязкой нефти состоит в том, что в интервале продуктивного пласта прокладывают пару двухустьевых горизонтальных скважин, одну над другой, состоящих каждая из двух вертикальных стволов, соединенных между собой горизонтальным участком. Эти скважины включают: обсадную трубу, проложенную от одного устья до другого и перфорированную в пределах горизонтального участка; две насосно-компрессорные трубы (НКТ), проложенные внутри обсадной трубы в пределах вертикальных стволов и заканчивающиеся хвостовиками в начале горизонтального участка скважины, перед перфорированным участком обсадной трубы. Верхняя скважина является нагнетательной и служит для подачи в продуктивный пласт водяного пара, а нижняя скважина – добывающая, служит для откачки продукта. Горизонтальный участок обсадной трубы изолируют с обеих сторон пакерами, установленными на хвостовиках НКТ. Двухустевая нагнетательная скважина строится вдоль свода продуктивного пласта, а добывающая двухустевая скважина – вдоль подошвы пласта.

Каждая скважина имеет вертикальный, наклонный и горизонтальный участки и состоит из обсадной трубы и двух насосно-компрессорных труб. Две НКТ расположены внутри обсадной трубы на протяжении обоих вертикальных участков и заканчиваются в начале горизонтального участка, со стороны своих устьев, непосредственно перед началом перфорированного участка обсадной трубы. Для первоначального прогрева пласта подают пар по обеим скважинам. При этом создают проницаемую зону между скважинами и паровую камеру над нагнетательной скважиной. После этого подачу пара по добывающей скважине прекращают и осуществляют по ней извлечение расплавленной нефти. Подачу пара по нагнетающей скважине продолжают в течение периода добычи. Недостатком такого способа представляются защемление части нефти в поровых каналах пласта образующимся конденсатом воды и, в результате этого, неполное извлечение нефти.

Повысить эффективность вышеизложенного способа добычи предлагается за счет совмещения SAGD с волновым воздействием на продуктивный пласт. Для этого на обоих хвостовиках НКТ нагнетательной скважины, сразу за пакерами, устанавливают проточные генераторы упругих колебаний, направленные лицевыми поверхностями друг к другу. В этом случае создается объемный полуволновой резонатор из горизонтального участка обсадной трубы, заключенного между проточными генераторами. Закачивая пар в нагнетательную скважину по НКТ и прокачивая весь пар через проточные генераторы, в потоке пара возбуждаются упругие колебания на одной из высших собственных частот объемного резонатора. Схема реализации предлагаемого способа представлена на рис. 1. Регулировка частоты генерации упругих колебаний может осуществляться изменением давления подачи пара по каждой НКТ отдельно. При этом в объемном резонаторе формируется система бегущих навстречу друг другу волн.



В случае, если генераторы настроены на одну частоту, в объёмном резонаторе формируется стоячая волна. При настройке генераторов на близкие частоты в объёмном резонаторе формируется система из двух бегущих навстречу друг другу волн с медленно смещающимися по длине резонатора узлами и пучностями.

В качестве скважинных генераторов могут быть использованы устройства, описанные в работах [18, 19]. Эти устройства отличаются отсутствием подвижных элементов конструкции, а также необходимости подвода дополнительной энергии для их работы.

Рассмотрим процесс распространения упругих волн из скважины в пласт. Процессы распространения колебаний в скважинах с перфорацией рассмотрены ранее, например, в работе [20]. В настоящей статье допустим, что значительная часть энергии стоячих волн переходит из скважины в пласт через стенку обсадной трубы, а не через перфорационные отверстия, ввиду того, что площадь поверхности трубы значительно больше суммарной площади отверстий перфорации.

Итак, имеется обсадная труба скважины, представляющей собой цилиндр с внутренним радиусом  $r_1$  и наружным радиусом  $r_2$ . Вследствие осевой симметрии трубы нагрузки напряжения и деформации в трубе, при изменении давления внутри трубы, будут также симметричны относительно её оси. Подход к расчёту радиального перемещения наружной поверхности обсадной колонны скважины аналогичен решению задачи для толстостенных цилиндров [21]. В результате повышения внутреннего давления на величину  $p$  произойдет радиальное перемещение наружной поверхности обсадной колонны скважин:

$$u = \left( \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right) \frac{p}{E}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга материала трубы (для стали  $E = 210$  ГПа).

Таким образом, если в скважине имеется пульсирующее давление  $P = p_0 + p \cdot \sin(\omega t)$ , то оно вызывает периодическое перемещение поверхности обсадной колонны скважины с амплитудой  $u$ , определяемой по формуле (1). В свою очередь, перемещение наружной поверхности обсадной колонны, контактирующей с окружающей средой, приводит к возбуждению цилиндрической упругой волны с амплитудой, равной

$$p_k = u \omega \rho c, \quad (2)$$

где  $\omega$  – циклическая частота,  $c^{-1}$ ;  $\rho$  – плотность окружающей среды,  $кг/м^3$ ;  $c$  – скорость звука в среде,  $м/с$ .

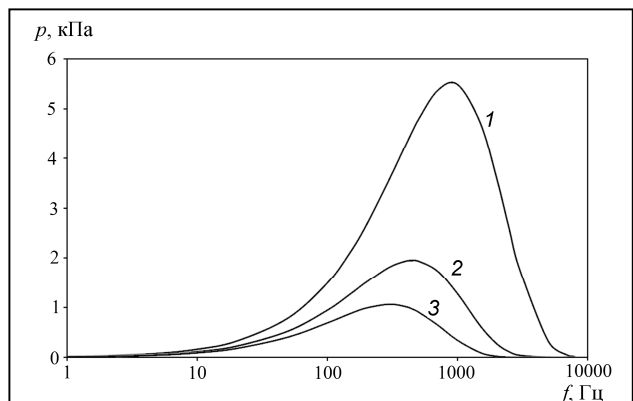
Генерируемые цилиндрические волны распространяются в глубь пласта, при этом амплитуда этих волн снижается с увеличением расстояния  $r$  от скважины согласно формуле [4]:

$$p_k(r) = p_k \sqrt{\frac{r_c}{r}} e^{-\alpha(r-r_c)}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания упругих волн в продуктивном пласте,  $м^{-1}$ ;  $r_c = r_2$  – радиус скважины,  $м$ .

Полученные выражения позволяют оценить уровень амплитуды колебаний в продуктивном пласте на различном удалении от нагнетательной скважины. Рассчитаем распределение амплитуды колебаний для продуктивного пласта Ашальчинского месторождения (Республика Татарстан). Это месторождение расположено на глубине 90 м и представляет собой неоднородные пласты толщиной 20...30 м с температурой 8 °С, давлением 0,5 МПа, нефтенасыщенностью 0,70, пористостью 30 %, проницаемостью 0,265  $мкм^2$ , с нефтью, имеющей плотность 956  $кг/м^3$  и вязкость 12206  $мПа \cdot с$ . На рис. 2 представлены расчетные зависимости амплитуды колебаний в пласте от частоты для указанных пластовых характеристик месторождения. Амплитуда колебаний, генерируемых в нагнетательной скважине, составляет 0,05 МПа. Видно, что с увеличением расстояния от нагнетательной скважины амплитуда существенно снижается. Так, на расстоянии 5 м от скважины максимальная амплитуда уменьшается всего в 9 раз, а на расстоянии 15 м – почти в 50 раз. Такой интенсивности колебаний вполне достаточно для того, чтобы интенсифицировать процессы теплопереноса в продуктивных пластах. При этом следует отметить также "резонансный" характер процесса распространения колебаний из скважины в пласт. На рис. 2 также видно, что существуют определенные частоты колебаний, на которых амплитуда в глубине пласта имеет максимальные значения. Наряду с очевидным выводом о том, с увеличением частоты колебаний радиус зоны воздействия существенно снижается, получается, что на низких (инфразвуковых) частотах эффективность воздействия также низкая – амплитуда колебаний снижается более чем на 2 порядка.

Полученные результаты свидетельствуют также о том, что с увеличением расстояния от нагнетательной скважины оптимальная частота смещается в сторону уменьшения. Это означает, что на начальном этапе разработки месторождения, когда фронт вытеснения



**Рис. 2.** Зависимости амплитуды колебаний давления в продуктивном пласте от частоты на различных расстояниях  $r$  от нагнетательной скважины: 1 –  $r = 5$  м; 2 –  $r = 10$  м; 3 –  $r = 15$  м

находится ближе к нагнетательной скважине, наиболее эффективным будет воздействие на больших частотах (порядка кГц). В процессе выработки пласта граница вытеснения распространяется в глубь пласта от нагнетательной скважины, и тогда необходимы низкие частоты (порядка сотен Гц). Таким образом, полученные результаты могут быть основой для выбора оптимальной частоты волнового воздействия на пласт.

### Заключение

В работе предложен способ совмещения волнового воздействия с технологией парогравитационного воздействия на пласт в условиях двухустевых горизонтальных скважин. Рассмотрен процесс формирования в нагнетательной скважине стоячих волн и распространения энергии упругих колебаний в продуктивный пласт через стенку скважины. Установлено существование диапазона частот воздействия, при которых происходит минимальное поглощение упругих волн. Показано, что с увеличением расстояния от нагнетательной скважины значение оптимальной частоты смещается в сторону уменьшения. Полученные результаты могут быть основой для выбора оптимальной частоты волнового воздействия на пласт.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кравцов Я.И., Марфин Е.А. Волновое воздействие на продуктивные пласты как универсальный способ повышения эффективности добычи тяжелых нефтей и природных битумов // Георесурсы. – 2011. – № 3. – С. 17–18.
2. Гатауллин Р.Н., Кравцов Я.И., Марфин Е.А. Интенсификация добычи трудноизвлекаемых углеводородов за счет интегрированного тепловолнового воздействия на пласт // Нефт. хоз-во. – 2013. – № 1. – С. 90–93.
3. Новые технологии в нефтегазовой геологии и разработке месторождений / И.П. Попов, А.А. Томилов, А.А. Авершин, А.Л. Солодовников // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2014. – № 3. – С. 51–58.
4. Вахитов Г.Г., Симкин Э.М. Использование физических полей для извлечения нефти из пластов. – М.: Недра, 1985. – 231 с.
5. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия / В.П. Дыбленко, Р.Н. Камалов, Р.Я. Шарифуллин, И.А. Туфанов. – М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000. – 381 с.
6. Прокопцев В.О. Физические методы увеличения нефтеотдачи пластов (обзор) // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2015. – № 3. – С. 53–60.
7. Beresnev I.A., Johnson P.A. Elastic-Wave Stimulation of Oil Production: A Review of Methods and Results // Geophysics. – 1994. – Vol. 59. – Pp. 1000–1017.
8. Changes in permeability caused by transient stresses: Field observations, experiments, and mechanisms / M. Manga, I. Beresnev, E.E. Brodsky, J.E. Elkhout, D. Elsworth, S.E. Ingebritsen, D.C. Mays, C.-Y. Wang // Reviews of Geophysics. – 2012. – Vol. 50. – № 2. – RG2004.
9. Иванников В.И. Кольматация и декольматация призабойной зоны пласта в скважинах // Геология, геофизика и

- разработка нефтяных и газовых месторождений. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2011. – № 4. – С. 56–60.
10. Барабанов В.Л. Анализ механизма сейсмического воздействия на нефтяные залежи с точки зрения фрактальности фильтрационных процессов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2008. – № 3. – С. 35–43.
  11. Ультразвуковая технология повышения продуктивности низкодебитных скважин / М.С. Муллакаев, В.О. Абрамов, А.А. Печков, И.Л. Еременко, В.М. Новоторцев, В.М. Баязитов, И.Б. Есипов, Д.А. Баранов, А.А. Салтыков // Нефтепромысловое дело. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2012. – № 4. – С. 25–32.
  12. О процессах, определяющих механизм интегрированного воздействия на нефтяной пласт / Я.И. Кравцов, Э.А. Буторин, Е.А. Марфин, Р.Н. Гатауллин // Георесурсы. – 2009. – № 1. – С. 43–45.
  13. Шандрыгин А.Н., Нухаев М.Т., Тертычный В.В. Разработка залежей тяжелой нефти и природного битума методом парогравитационного дренажа (SAGD) // Нефт. хоз-во. – 2006. – № 7. – С. 92–96.
  14. Курочкин Б.М. Технологии добычи природных битумов термогравитационным способом // Бурение и нефть. – 2007. – № 2. – С. 29–33.
  15. Способ разработки нефтебитумной залежи: пат. 2287677 РФ. № 2005139323/03; заявл. 16.12.05; опубл. 20.11.06.
  16. Анализ эффективности термоволнового воздействия на Мордово-Кармальском месторождении / Р.Х. Муслимов, Ю.В. Волков, А.Я. Хавкин, А.М. Петраков, В.Е. Алемасов, Я.И. Кравцов, Э.А. Буторин, Е.А. Марфин // Бурение и нефть. – 2003. – № 1. – С. 18–23.
  17. Способ разработки углеводородного месторождения: пат. 2244813 РФ. № 2002135000/03; заявл. 25.12.02; опубл. 20.01.05.
  18. Марфин Е.А., Кравцов Я.И. Выбор оптимальных геометрических параметров излучателя на основе резонатора Гельмгольца // Изв. РАН. Энергетика. – 2005. – № 6. – С. 108–113.
  19. Способ и устройство для генерирования колебаний давления в потоке жидкости: пат. 2464109 РФ. № 2010120558/28; заявл. 21.05.10; опубл. 20.10.12.
  20. Гатауллин Р.Н., Кравцов Я.И., Марфин Е.А. Распространение упругих волн на участке перфорированной обсадной колонны скважины // Тр. Академэнерго. – 2009. – № 4. – С. 84–93.
  21. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.

### LITERATURA

1. Kravtsov Ya.I., Marfin E.A. Volnoye vozdeystvie na produktivnye plasty kak universal'nyy sposob povysheniya effektivnosti dobychi tyazhelykh neftey i prirodnykh bitumov // Georesursy. – 2011. – № 3. – S. 17–18.
2. Gataullin R.N., Kravtsov Ya.I., Marfin E.A. Intensifikatsiya dobychi trudnoizvlekaemykh uglevodородov za schet integrirovannogo teplovолnovого vozdeystviya na plast // Neft. khoz-vo. – 2013. – № 1. – S. 90–93.
3. Novye tekhnologii v neftegazovoy geologii i razrabotke mestorozhdeniy / I.P. Popov, A.A. Tomilov, A.A. Avershin, A.L. Solodovnikov // Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2014. – № 3. – S. 51–58.
4. Vakhitov G.G., Simkin E.M. Ispol'zovanie fizicheskikh poley dlya izvlecheniya nefti iz plastov. – М.: Nedra, 1985. – 231 s.