

УДК 550.834

**АНАЛИЗ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА,
ДЕЙСТВУЮЩЕГО ВДОЛЬ ОСИ СКВАЖИНЫ**

В. В. Сказка, С. В. Сердюков*, Г. Н. Ерохин, А. С. Сердюков***

*Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН,
проспект академика Коптюга, 4, 630090, Новосибирск, Россия*
**Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*
***Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
ул. Александра Невского, 14, 236041, г. Калининград, Россия*

Разработана и численно исследована модель ближней зоны излучения скважинного сейсмического источника ударного действия. Приведены результаты оценки энергии воздействия на продуктивный горизонт с пониженной скоростью распространения сейсмических волн при различном расположении источника относительно пласта.

Сейсмический источник, скважина, ближняя зона излучения, сила вдоль оси скважины

В горном деле сейсмические источники применяют как для контроля техногенных процессов [1, 2], так и для повышения эффективности скважинных технологий добычи полезных ископаемых [3]. В последнем случае областью воздействия является, в основном, призабойная зона продуктивного пласта, гидродинамические параметры которой существенно влияют на добычные возможности эксплуатационных скважин.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что сейсмическое воздействие способствует очистке этой зоны от загрязняющих веществ, развитию в ней имеющихся и созданию новых фильтрационных каналов [4–8]. Указанная способность лежит в основе разнообразных технологий, наиболее широко применяемых при добыче нефти и природного газа [9–13], реже — для интенсификации дегазации угольных пластов [14], внутрискважинного горения [15], подземного выщелачивания металлов [16] и др.

Одним из главных факторов, определяющих успешность промысловых работ, является удельная мощность сейсмического излучения в продуктивном пласте, что предполагает выбор вида источника и режима его работы, обеспечивающих максимальный поток сейсмической энергии. Такая постановка задачи связана с тем, что активное воздействие сейсмических волн на вмещающие горные породы предполагает нелинейный характер взаимодействия с геологической средой и необратимые изменения ее свойств. Это отличает горнотехнологические источники от сейсморазведочных, главным требованием к которым является повторяемость сигналов и стабильность условий возбуждения упругих волн.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 8668) и частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-05-31493).

Наибольшее практическое распространение получили источники, реализующие следующие виды силового воздействия на стенки скважины (рис. 1): радиально-симметричное нагружение переменным давлением, касательное импульсное нагружение стенок скважины вдоль ее оси (осевой удар), импульсное однонаправленное нагружение перпендикулярно оси скважины (боковой удар), вращающаяся сила постоянной амплитуды (дебалансный вибратор).

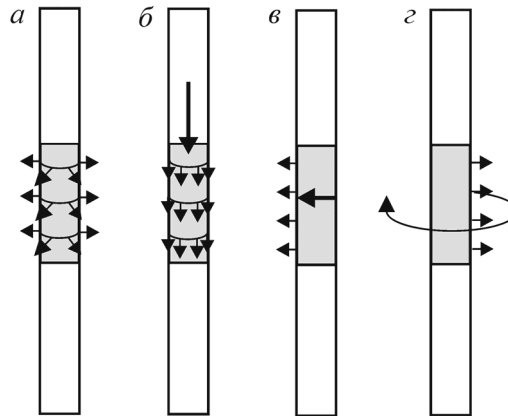


Рис. 1. Виды силового воздействия в скважинных сейсмических источниках: *а* — радиально-симметричное нагружение переменным давлением; *б* — касательное импульсное нагружение стенок скважины вдоль ее оси (осевой удар); *в* — импульсное однонаправленное нагружение перпендикулярно оси скважины (боковой удар); *г* — вращающаяся сила постоянной амплитуды (дебалансный вибратор)

Математическое моделирование таких источников ограничивается, как правило, дальнейшей зоной цилиндрического излучателя конечной длины [17], помещенного в безграничное однородное упругое пространство с равномерным распределением силы по боковой поверхности цилиндра, которая может быть направлена радиально, вдоль оси источника или в направлении вращения цилиндра вокруг своей оси [18]. Волновое поле вблизи источника с точки зрения разведочной геофизики не представляет практического интереса. Исключение составляет наиболее простой случай радиально симметричного распределения силы с амплитудой, меняющейся по гармоническому закону, который иногда рассматривают в качестве модельной задачи при оценке зависимости мощности излучения акустических источников от частоты генерируемых колебаний.

Очевидно, что для решения задач горного дела этого не достаточно. При сейсмическом воздействии на нефтегазовые залежи возникает специальная задача оценки интенсивности волнового поля в низкоскоростном слое при размещении источника вне продуктивного пласта, что связано с отсутствием надежного сцепления обсадной колонны скважины с вмещающими горными породами в интервале перфорации.

В настоящей статье выполнен численный анализ ближней зоны излучения скважинного сейсмического источника, в котором импульс возмущающей силы направлен вдоль оси скважины. Интерес к такому источнику связан с разнообразием его известных технических реализаций, основанных на использовании систем, распространенных в нефтегазодобывающей отрасли, таких как спуско-подъемные агрегаты подземного ремонта скважин [19], станки-качалки [20], канатно-ударные буровые станки, штанговые глубинные насосы [21–23], пакерные системы [24, 25] и др.

Модель источника. Рассмотрим задачу в радиально симметричной постановке в цилиндрических координатах с использованием переменных “скорость – напряжение”. Систему уравнений Ламе запишем в виде

$$(V_p^2 - V_s^2)\nabla(\nabla\vec{u}) + V_s^2\nabla\vec{u} = \frac{\partial\vec{u}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где $\vec{u} = (u_r, u_\varphi, u_z)$ — вектор смещений; $V_p^2 = (\lambda + 2\mu) / \rho$; $V_s^2 = \mu / \rho$; λ, μ — коэффициенты Ламе; ρ — плотность среды; z, r, φ — цилиндрическая система координат; t — время.

Для численного решения (1) разработан оригинальный способ дискретизации по пространственным переменным с последующим численным решением системы обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге–Кутты.

Решение системы (1) будем искать в прямоугольной области $D = [r_0, R] \times [-Z, Z]$, где r_0 — радиус скважины. На границе с D зададим следующие краевые условия:

$$\begin{aligned} v_r(r, Z) = v_z(r, Z) = 0; \quad r \in [r_0, R], \\ v_r(R, z) = v_z(R, z) = 0; \quad z \in [-Z, Z], \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sigma_{zz}(r, -Z) = \sigma_{rz}(r, -Z) = 0; \quad r \in [r_0, R],$$

$$\sigma_{rr}(r_0, z) = -f_r(z, t), \quad \sigma_{rz}(r_0, z) = -f_z(z, t), \quad z \in [-Z, Z].$$

Здесь f_r, f_z — компоненты вектора напряжений, действующих на стенку скважины; σ_{ij} и v_i — компоненты тензора напряжений и вектора скоростей смещений. При осевом ударе f_r не зависит от t . Случай симметричного нагружения стенок скважины внутренним давлением ($f_z = 0$) используется для сравнительной оценки исследуемого источника.

Кроме того, зададим начальные условия:

$$v|_{t=0} = 0, \quad \sigma|_{t=0} = 0. \quad (3)$$

Численные эксперименты. Для проведения численных расчетов задачи (1)–(3) была выбрана модель среды, схематично представленная на рис. 2.

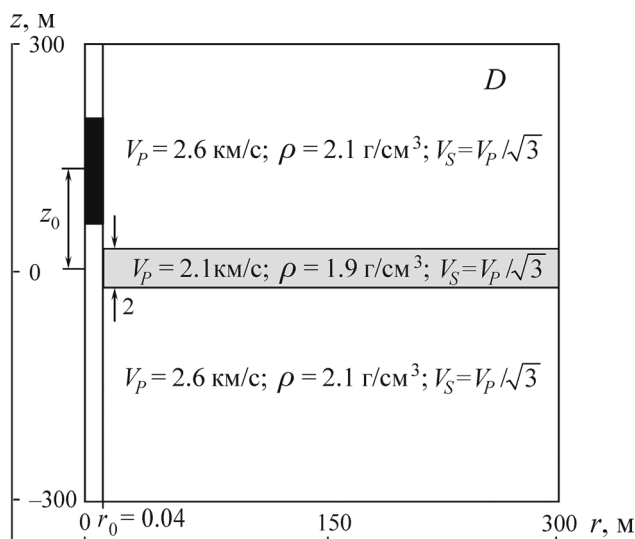


Рис. 2. Модель геосреды для проведения численных экспериментов

При численных расчетах выбраны следующие значения: $r_0 = 0.04$ м; $R = Z = 300$ м. В середине D расположен двухметровый продуктивный пласт (объект сейсмического воздействия) с пониженной скоростью. Так как в разностной модели предполагалась непрерывность параметров задачи, то на обеих границах продуктивного пласта дополнительно введены переходные слои толщиной в 0.05 м каждый, в которых происходит гладкое сопряжение параметров среды. Используемые значения скоростей и плотности геосреды даны на рис. 2.

Функции f_r, f_z из (2) будем задавать в виде $F(z, t) \equiv f(t)g(z - z_0)$, где $g(z)$ — гладкая функция, такая что $g(z) \equiv 1$ при $|z| < 1/4$ и $g(z) \equiv 0$ при $|z| > 1/2$, а $f(t)$ построена по типу импульса Пузырева: $f(t) = a_0 t^3 \sin(2\pi\eta_0 t) \exp(-pt^2)$. В расчетах использовались следующие значения параметров импульса: начальная амплитуда $a_0 = 10^{11}$ Н/с³; преобладающая частота $\eta_0 = 40$ Гц; затухание $p = 10529$ с⁻². Для указанных значений параметров максимум силового воздействия на стенки скважины составляет 25 кН, что соответствует реальным показателям скважинных гидроударных систем [26].

Размер расчетной области для заданных скоростных характеристик геосреды и параметров сейсмического импульса в соответствии с постановкой задачи ограничен ближней зоной излучения сейсмического источника: $\leq 7\lambda_0$, где λ_0 — длина продольной волны частотой 40 Гц.

Отметим, что вид силового воздействия в скважинных источниках сильно влияет как на эффективность излучения сейсмической энергии, которая при $f_r(z, t) = F(z, t), f_z(z, t) = 0$ существенно меньше, чем при $f_r(z, t) = 0, f_z(z, t) = F(z, t)$, так и на амплитуду генерируемой силы. Так, в “распорном” скважинном источнике легко достижима сила до 10^7 Н, в то время как в источнике одностороннего действия, действующего внутри среды, технически сложно получить силу и на 2 порядка меньше указанной величины [17]. Поэтому расчетную энергию будем нормировать на полную сейсмическую энергию волнового поля E_0 во всей геосреде после окончания действия силового импульса.

В первом эксперименте полагалось $z_0 = 0$, т. е. источник размещен в центре продуктивного пласта. Были проведены расчеты для случаев: 1 — $f_r(z, t) = F(z, t), f_z(z, t) = 0$ и 2 — $f_r(z, t) = 0, f_z(z, t) = F(z, t)$. Соответствующие графики приведены на рис. 3. На рис. 4 показано отношение зависимостей, представленных на рис. 3.

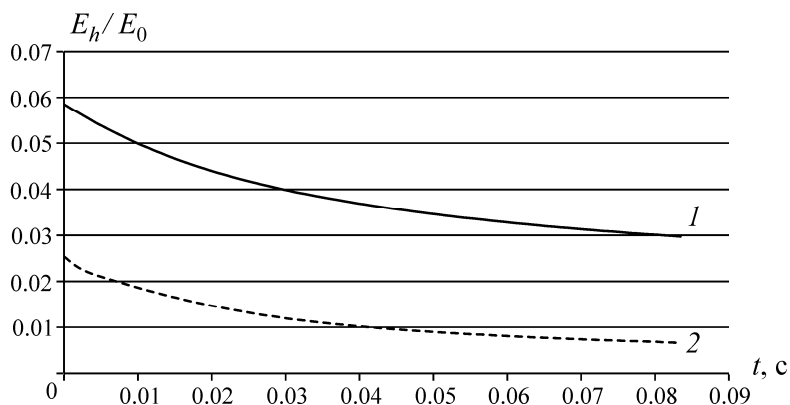


Рис. 3. Отношение сейсмической энергии, закаченной в продуктивный пласт E_n , к полной сейсмической энергии волнового поля во всей геосреде: 1 — источник вида $f_r(z, t) = F(z, t), f_z(z, t) = 0$; 2 — источник вида $f_r(z, t) = 0, f_z(z, t) = F(z, t)$

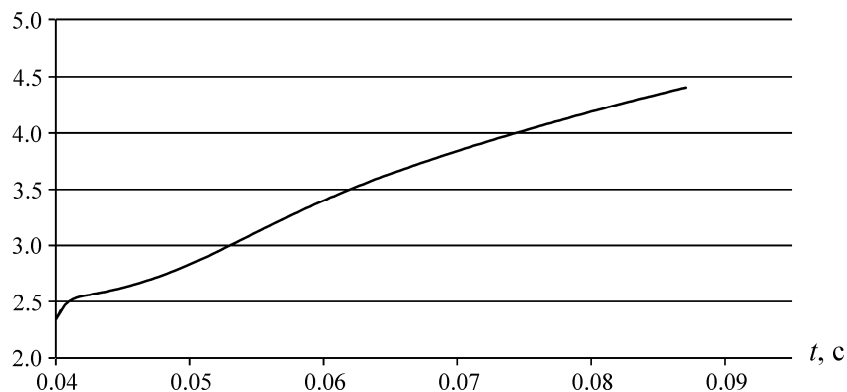


Рис. 4. Отношение эффективностей закачки сейсмической энергии в продуктивный пласт для источников вида $f_r(z,t)=0$, $f_z(z,t)=F(z,t)$ и $f_r(z,t)=F(z,t)$, $f_z(z,t)=0$ (согласно рис. 3)

Как видно из приведенных графиков, с точки зрения закачки сейсмической энергии в продуктивный пласт, выгоднее использовать силовое воздействие вдоль оси скважины.

Мгновенные снимки волнового поля, полученные при расчетах, показаны на рис. 5, 6.

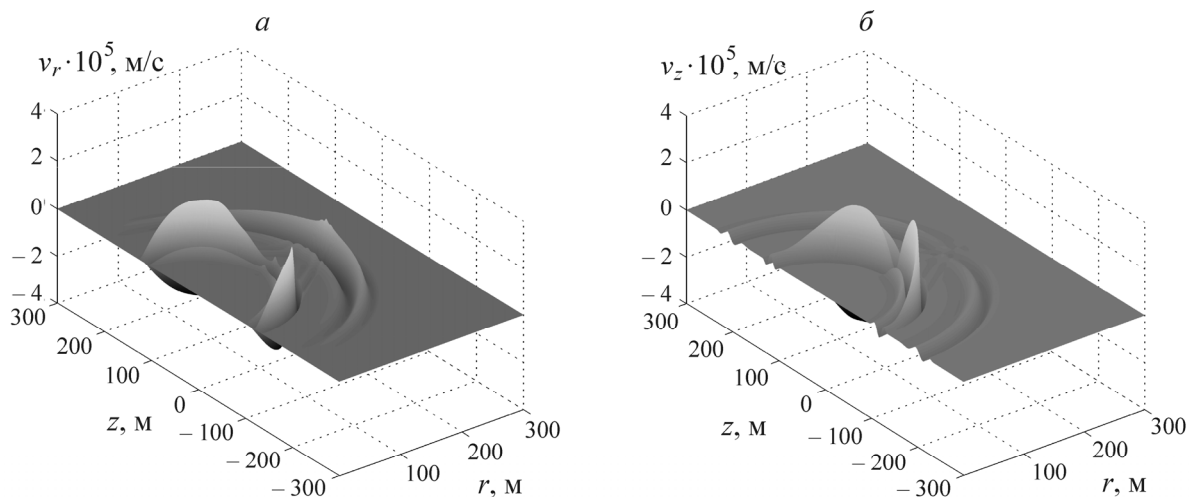


Рис. 5. Зависимости v_r , v_z для источника вида $f_r(z,t)=F(z,t)$, $f_z(z,t)=0$ при $t=0.09$ с, $z_0=0$

Результаты обработки “мгновенных” снимков волнового поля обобщены в сводных графиках рис. 7, на которых показано, как изменяется отношение сейсмической энергии в продуктивном пласте к полной энергии волнового поля во всей среде при смещении источника вида $f_r(z,t)=0$, $f_z(z,t)=F(z,t)$ относительно центра пласта. Расчеты выполнены для источника, находящегося выше середины продуктивного пласта на расстояниях $z_0=0$, $z_0=2$, $z_0=8$ и $z_0=15$ м.

Графики рис. 7 отображают сейсмическую энергию в продуктивном пласте, переносимую как вертикальными, так и радиальными компонентами упругих колебаний. Но, как показывают экспериментальные исследования, эффективность сейсмического воздействия определяется в основном радиальными компонентами волнового поля [27]. Так, по результатам обработки добывающих скважин нефтепродуктивного пласта БС₁₀₋₂ Суторминского месторождения было получено следующее соотношение между относительным увеличением добычи нефти $\Delta q_p / q_p$ и амплитудами вертикальных A_z и радиальных A_r колебаний [28]:

$$\Delta q_P / q_P \approx 14.33 A_r + 4.156 A_z, \quad (4)$$

где амплитуды колебаний исчисляются в нанометрах, а относительное увеличение добычи нефти в процентах. Коэффициент корреляции между расчетными и фактическими значениями составляет 0.83 [27].

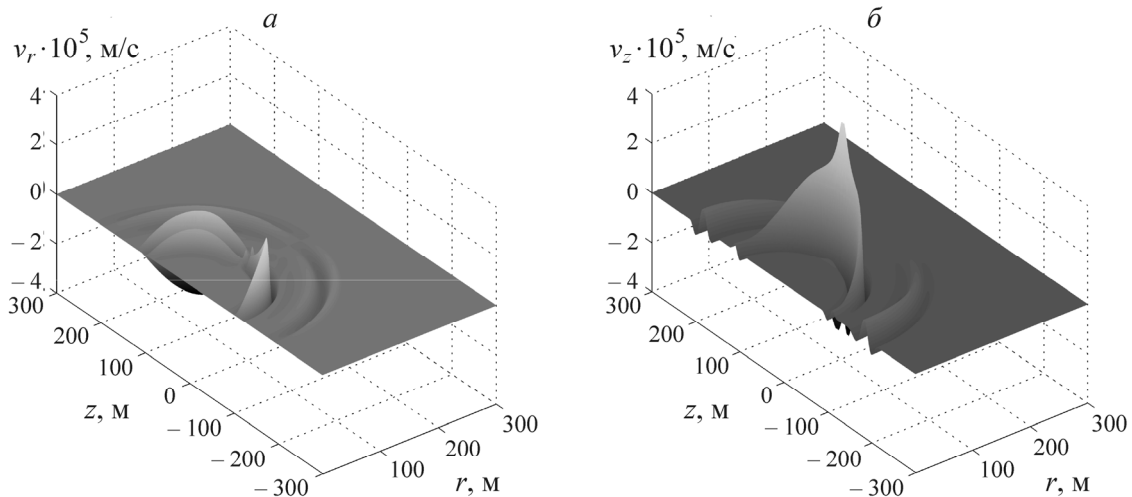


Рис. 6. Зависимости v_r , v_z для источника вида $f_r(z,t) = 0$, $f_z(z,t) = F(z,t)$ при $t = 0.082$ с, $z_0 = 0$

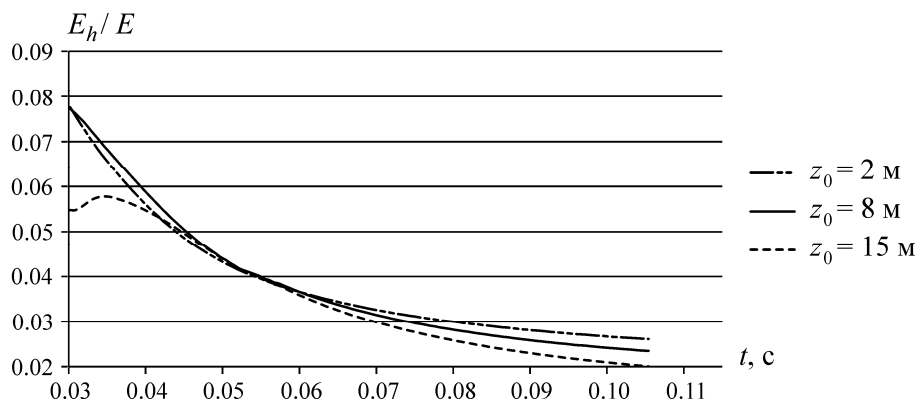


Рис. 7. Графики относительных сейсмических энергий, закаченных в продуктивный пласт при различных положениях источника относительно центра пласта

Для определения оптимального положения скважинного источника с учетом поляризации упругих колебаний рассмотрим излучаемую сейсмическую энергию покомпонентно:

$$E_r(r) = \frac{1}{2} \int_0^T \int_{-2.5}^{2.5} v_r^2(t, r, z) \rho(r, z) dz dt, \quad E_z(r) = \frac{1}{2} \int_0^T \int_{-2.5}^{2.5} v_z^2(t, r, z) \rho(r, z) dz dt,$$

где E_r , E_z означают соответственно сейсмическую энергию “перенесенную”, v_r и v_z компонентами волнового поля и прошедшую за время T через прямоугольную площадку на расстоянии r от скважины со сторонами: по оси z — $(-2.5; 2.5)$, по перпендикулярному к оси z направлению — $(0, 1)$, нормаль к которой направлена к центру скважины.

На рис. 8 и 9 представлены соответственно графики E_r/E_0 и E_z/E_0 при трех различных положениях источника: $z_0 = 2$, $z_0 = 8$ и $z_0 = 15$ м. Кривые указанных графиков доведены до тех значений r , при которых волновой пакет уже полностью прошел эту точку за расчетное время.

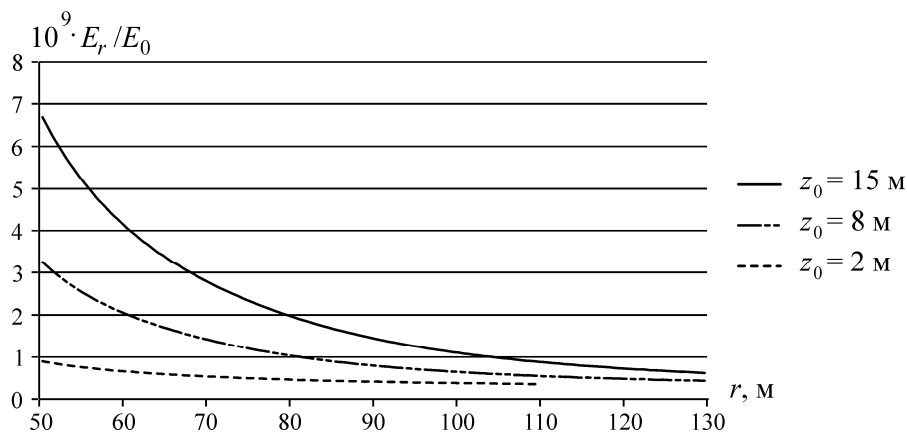


Рис. 8. Графики E_r/E_0 при $z_0 = 2$, $z_0 = 8$ и $z_0 = 15$ м

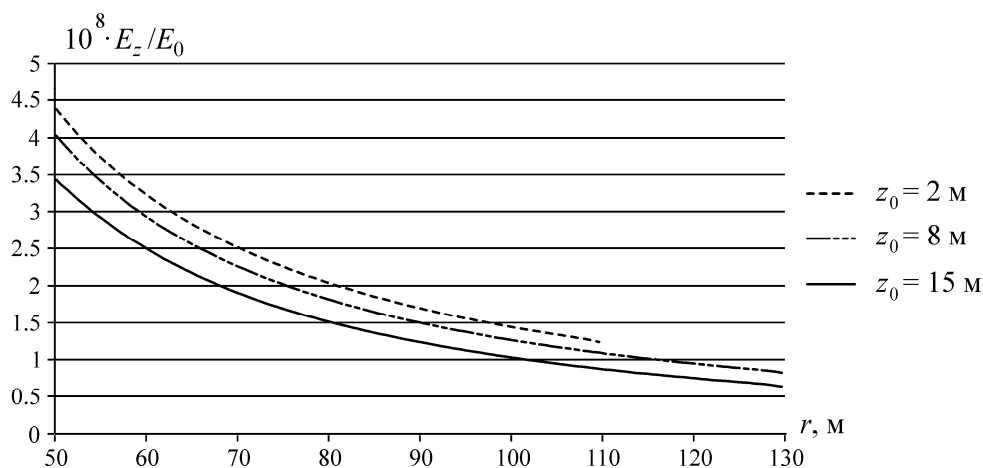


Рис. 9. Графики E_z/E_0 при $z_0 = 2$, $z_0 = 8$ и $z_0 = 15$ м

Из приведенных графиков видно, что с точки зрения эффективности сейсмического воздействия радиальными компонентами колебаний наиболее предпочтительно размещение данного источника вне продуктивного пласта. Так, его смещение относительно центра пласта на 15 м увеличивает удельную энергию воздействия радиальными колебаниями примерно в 7 раз. Энергия воздействия вертикальными колебаниями при этом уменьшается незначительно и при любом анализируемом смещении на порядок выше, чем у радиальных колебаний. Отсюда следует, что скважинный источник типа “осевой удар” не обеспечивает выполнение условия оптимальной поляризации колебаний (4) в ближней зоне излучения ни при каком расположении. Это, возможно, и объясняет его малое влияние на дебит скважин по жидкости [29, 30].

ВЫВОДЫ

1. Выполнен численный анализ ближней зоны изучения импульсного скважинного сейсмического источника типа “осевой удар”. Указанный источник обеспечивает более эффективную

закачку сейсмической энергии в продуктивный пласт с пониженной скоростью, чем источник с радиально-симметричным нагружением стенок скважины переменным давлением.

2. Численные расчеты показали, что для повышения интенсивности сейсмического воздействия радиальными компонентами колебаний предпочтительно размещать источник вне продуктивного пласта. Энергия воздействия вертикальными колебаниями при этом уменьшается незначительно и при любом рассмотренном положении источника на порядок выше, чем у радиальных (вдоль пласта) колебаний.

3. На основании расчетов видно, что скважинный источник типа “осевой удар” не обеспечивает выполнение эмпирического условия оптимальной поляризации колебаний в ближней зоне излучения ни при каком смещении относительно центра продуктивного пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дрягин В. В., Кузнецов О. Л., Стародубцев А. А., Рок В. Е. Поиск углеводородов методом вызванной сейсмоакустической эмиссии в скважинах // Акуст. журн. — 2005. — Т. 51. — № 7.
2. Alekseev A., Serdyukov S. On some characteristics of rocks that reveal themselves after long sessions of vibration action, Proceedings of 1st International Workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics (IWAM04), Mizunami, Japan, June 30–July 2, 2004.
3. Алексеев А. С., Геза Н. И., Глинский Б. М., Еманов А. Ф., Кашун В. Н., Ковалевский В. В., Манштейн А. К., Михайленко Б. Г., Селезнев В. С., Сердюков С. В., Собисевич А. Л., Собисевич Л. Е., Соловьев В. М., Хайретдинов М. С., Чичинин И. С., Юшин В. И. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / отв. ред. Г. М. Цибульчик. — Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, филиал “Гео” изд-ва СО РАН, 2004.
4. Свалов А. М. О механизме волнового воздействия на продуктивные пласты // Нефтяное хозяйство. — 1996. — № 7.
5. Алексеев А. С., Алтунина Л. К., Белоносов В. С., Доровский В. Н., Имомназаров Х. Х., Сердюков С. В., Сказка В. В. Физико-математическая модель процессов в нефтеносном пласте при волновых воздействиях // Интервал. — 2005. — № 11.
6. Николаевский В. Н., Степанова Г. С. Нелинейная сейсмика и акустическое воздействие на нефтеотдачу пласта // Акуст. журн. — 2005. — Т. 51. — № 7.
7. Kurlenya M. V., Serdyukov S. V. Reaction of fluids of an oil-producing stratum to low-intensity vibroseismic action, Journal of Mining Science, 1999, Vol. 35, No. 2.
8. Сердюков С. В., Курленя М. В. Механизм стимуляции добычи нефти сейсмическими полями малой интенсивности // Акуст. журн. — 2007. — Т. 53. — № 5.
9. Гадиев С. М. Использование вибрации в добыче нефти. — М.: Недра, 1977.
10. Дыбленко В. П., Камалов Р. Н., Шарифуллин З. Я., Туфанов И. А. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия. — М.: Недра, 2000.
11. Сердюков С. В. Разработка вибротсейсмического способа воздействия на нефтепродуктивные пласты с дневной поверхности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1998.
12. Садовский М. А., Абасов М. Т., Николаев А. В. Перспективы вибрационного воздействия на нефтяную залежь с целью повышения нефтеотдачи // Вест. АН СССР. — 1986. — № 9.
13. Малахов А. П., Ряшенцев Н. П., Макарюк Н. В. Обоснование конструктивной схемы источника вибротсейсмических колебаний для вибрационного просвечивания Земли / Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. — М.: Наука, 1981.
14. Макарюк Н. В., Клишин В. И., Золотых С. С. Исследование влияния виброчувствительности горных пород на метаноотдачу угольных пластов при вибротсейсмическом воздействии // ГИАБ. — 2002. — Т. 6.

15. **Сердюков С. В.** Влияние вибросейсмического поля на тепловые и фильтрационные процессы в битумном пласте // ФТПРПИ. — 2001. — № 2.
16. **Макарык Н. В.** Применение метода сейсмоволнового вибровоздействия для повышения фильтрационных и технологических параметров скважинного подземного выщелачивания металлов // ФТПРПИ. — 2009. — № 6.
17. **Чичинин И. С.** Вибрационное излучение сейсмических волн. — М.: Недра, 1984.
18. **Аво-Zena А. М.** Radiation from a finite cylindrical explosive source, *Geophysics*, 1977, No. 42.
19. **Патент № 2171354 РФ.** Способ волнового воздействия на продуктивный пласт и устройство для его осуществления / И. А. Исхаков, К. Х. Гайнуллин, Н. Х. Габдрахманов, И. М. Назмиев, Т. С. Галиуллин, А. М. Шамсутдинов, Р. Ф. Якупов, А. И. Кириллов, О. Н. Малец, С. Ф. Галимов, Ш. Г. Мингулов // Оpubл. в БИ. — 2011. — № 21.
20. **Лисовский Н. Н., Ащепков М. Ю., Ащепков Ю. С., Сухов А. А.** Новая концепция волновых технологий при проектировании и разработке нефтегазовых месторождений // Вестн. ЦКР Роснедра. — 2009. — № 6.
21. **Свалов А. М.** Анализ возможностей использования штанговых глубинных насосов в качестве источников ударно-волнового воздействия на продуктивные пласты // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. — 2003. — № 3.
22. **Kostrov S., Wooden W.** In situ seismic stimulation shows promise for revitalizing mature fields, *Oil & Gas Journal*, 2005, Vol. 103, No. 15.
23. **Патент № 2327034 РФ.** Способ волновой обработки продуктивного пласта и устройство его осуществления / С. В. Сердюков, Г. Н. Ерохин, Е. Н. Чередников // Оpubл. в БИ. — 2008. — № 17.
24. **Сердюков С. В., Шер Е. Н., Александрова Н. И.** Расчет движения жидкости в нефтяной скважине под действием порохового генератора газов // ФТПРПИ. — 2002. — № 4.
25. **Патент № 2172400 РФ.** Способ обработки продуктивного пласта в призабойной зоне скважины и пакер для его осуществления / М. В. Курленя, С. В. Сердюков, Х. Б. Ткач // Оpubл. в БИ. — 2001. — № 23.
26. **Курленя М. В., Сердюков С. В.** Определение области вибросейсмического воздействия на месторождение нефти с дневной поверхности // ФТПРПИ. — 1999. — № 4.
27. **Сердюков С. В.** Экспериментальное обоснование вибросейсмической технологии добычи нефти: автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001.
28. **Курленя М. В., Сердюков С. В.** Волновые технологии добычи нефти и газа / Науч. отчет по проекту № 2006-РИ-112.0/001/369 Федер. целевой науч.-техн. прогр. РФ. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2006.
29. **Веселков С. Н.** Техничко-экономическая эффективность методов интенсификации добычи нефти // Недропользование – XXI век. — 2007. — № 2.

Поступила в редакцию 24/XII 2012