



УДК 531:628.112.2

## ВЫЯВЛЕНИЕ СЛАБЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ВОЗБУДИМЫХ ГРУНТОВЫХ СРЕДАХ

### IDENTIFICATION OF WEAK WAVE FIELDS IN EXCITABLE GROUNDWATER ENVIRONMENTS

**Цымбалов Александр Алексеевич**

кандидат технических наук,  
генеральный директор,  
ООО Группа компаний «Архимед»  
arhimed64@mail.ru

**Tsymbalov Alexander Alekseevich**

Ph.D, General Director,  
LLC Group of companies «Archimedes»  
arhimed64@mail.ru

**Аннотация.** В статье на отечественных и зарубежных исследованиях обосновывается возможность существования слабых волновых полей в возбудимых неоднородных средах заполненных флюидом. Рассмотрен механизм неустойчивого состояния грунта в возбудимой среде. Показана применимость автоволновых процессов в околоскважинных средах.

**Annotation.** In the article on domestic and foreign researches the possibility of existence of weak wave fields in excitable inhomogeneous media filled with fluid is proved. The mechanism of unstable state of soil in an excitable medium is considered. The applicability of the self-oscillatory processes in the borehole environments.

**Ключевые слова:** скважина, система пласт-скважина, состояние катастрофы, бифуркация, волна, декольматация, кольматация, грунт околоскважинная среда.

**Keywords:** well, the system reservoir-well, the state of catastrophe, bifurcation, wave, decolmatation, colmatation, soil, priming the borehole environment.

Особенность волновых технологий заключается в создании внешних знакопеременных воздействий, как с постоянным, так и дискретным интервалом [1–3]. Применение волновых технологий в неоднородных средах заполненных флюидом показало определенные эффекты, связанные с преобразованием среды в системе пласт-скважина (пористость, давление, производительность и т.д.).

Целью работы является сбор имеющихся данных по вопросу влияния слабых волновых полей в локальных слоях неоднородной флюидной околоскважинной среды, испытывающей динамическое воздействие и преобразуемой в направлении технологических требований.

Предметом исследования являлись работы российских и зарубежных специалистов выполненные по динамическому возбуждению неоднородных сред.

Понимание процесса поведения системы пласт-скважина, находящейся с одной стороны под действием внешнего возбуждения, а с другой в состоянии кольматации (состояние деградации скважин), позволит нам найти оптимальное решение проблемы по декольматации среды. Изменение волновой нагрузки на закольматированный грунт пласта производимый по характерным точкам вертикальной оси скважины дает возможность проследить тенденцию поведения структуры грунта и выявить следующие этапы: а) начало перестройки (переупаковки) твердых элементов; б) разуплотнение поровых каналов; в) разрушение кольматационного осадка между зернами твердых частиц в системе пласт-скважина.

В работе [4] автором введено понятие катастрофы связанное с закольматированным фильтрационно-емкостным околоскважинным пространством. В [4–6] показано, что физические воздействия, созданные силовыми полями акустических волн и изменяющиеся во времени и пространстве, могут искусственно управлять режимом катастроф. Катастрофой согласно математической теории катастроф (ТК) является «скачкообразное изменение состояния системы (структуры), возникающее в виде внезапного ответа системы на изменение внешних и внутренних условий, описываемых набором или комплексом потенциальных функций, определяющих в математическом численном виде физические и не физические процессы» [7].

Модель развития катастрофы по ТК, подходя к точке бифуркации, имеет двойственный характер в виде нового равновесного устойчивого состояния (один вариант) или деформационных изменений при достижении уровня предела текучести твердого кольматанта с его разрушением (второй вариант – режим катастрофы).

Методика по решению прогностических задач на основе моделирования декольматации околоскважинных зон подробно рассмотрена в работе [4], где отмечено, что при внешнем искусственно созданном волновом поле от активизатора-деструктора будут накладываться циклические колебания



внутренних циклов систем (гидросферы, литосферы, атмосферы и др.). Эти небольшие возмущения случайного характера способны к локальным резонансным явлениям и проявлению в системе пласт-скважина механизма неустойчивости среды с потерей структурной прочности кольматанта (состояние катастрофы).

Рассмотрение механизма неустойчивости в возбудимой среде были выполнены Н. Винер и А. Розенблют. Они создали модель, осуществляющую связь элементов системы с помощью двух состояний: «возбуждения» и «покоя». Применимость модели к активным средам в технических процессах показала, что двух состояний, протекающих в возбудимых средах, недостаточно. Поэтому стали применять конструкцию из трех состояний: «возбуждение» (запуск процесса), «рефрактерность» (режим снижения возбудимости, соответствующей снижению нагрузки), «покоя» (один вариант: окончание процесса, второй вариант: остановка процесса, предусматривающая паузу в работе).

Применение таких моделей в реальных условиях с использованием волны удалось выявить условия, при которых могут существовать процессы в возбудимых средах с многократным прохождением волн. Причиной возникновения автоволновых процессов оказались локальные возмущения динамических параметров элементов возбудимой среды. При сочетании определенной частоты возбуждающих импульсов и определенной длительности рефрактерности в неоднородной среде возникают концентрические или спиральные самоподдерживающиеся волновые структуры, которые играют ведущую роль в локальных возмущениях (спиральные «ревербераторы»).

Изучение автоволновых процессов позволило понять механизм неустойчивости в активных средах, согласно которого нарушение однородности активной среды вело к появлению новых источников волн (ревербераторов), которые дезорганизовывали состояние системы.

Суть механизма состоит в следующем. Ревербинаторы имеют стадии жизненного цикла: рождения, активизации (существование), деградации (умирание). Неоднородные среды способны сочетать одновременно ревербераторы, уже находящиеся в системе и вновь появившиеся. Если скорость рожденных ревербераторов равна скорости деградированных, то локальные возмущения не отражаются на состоянии активной среды. В случае, если такое равновесие не соблюдается, а скорость появления рожденных ревербераторов превышает скорость уничтоженных, то общее число их растет. Поэтому в локальной области появляются хаотичные волновые осцилляции, которые дезорганизуют функционирование активной среды, внося в нее состояние аритмичности.

Рассмотрение автоволновых процессов на активных средах позволяет при всем формализованном подходе к ее решению считать механизм неустойчивости таких сред возможным к применению по отношению к реальным закольматированным околоскважинным средам, искусственно введенных в состояние акустического возбуждения.

О заметной роли малых отклонений автоколебаний, возникающих в окрестности возмущенных движений, на устойчивость состояния возбужденных систем отмечено Я.Г. Пановко в работе [8].

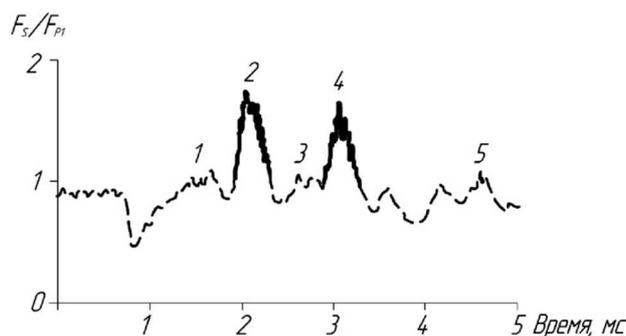
Повсеместно наблюдаемый исследователями спектр механических колебаний геофизической среды, имеющий природный и техногенный характер в виде слабых силовых полей, академическая наука долго игнорировала. Не было понятна способность накопления слабых колебаний в горных породах и грунтах с оказанием «созидательной» роли в деформационных процессах межблочных структур геофизической среды (ГФС).

Проведенные ряд исследований в СССР (Г.Г. Кочарян и В.Н.Родионов, 1988) и США (Дж. Меллош, 1987) доказали механизм преобразования слабых колебаний в трансформацию структуры горных масс в поступательное перемещение получившее название «акустическое разжижение» (Н.Дж. Меллош, 1987). Экспериментальные работы Г.Г. Кочаряна и В.Н.Родионова (1988) и теоретические разработки Г.Г. Кочаряна и А.Е. Федорова (1990) показали, что направленное излучение колебаний техногенным источником на геофизическую среду водонасыщенных грунтов усиливает эффекты от амплитуды слабых волновых полей хаотических колебаний. Полученные эффекты происходили в виду неоднородности нагружения отдельных блоков волновыми импульсами слабых полей (микроколебаний), вызывающих деформирование массива, т.к. на поверхности отдельных межблоковых контактов возникали дополнительные нормальные и сдвиговые напряжения. Знак напряжения на указанных контактах менялся при переменности фаз растяжение/сжатие.

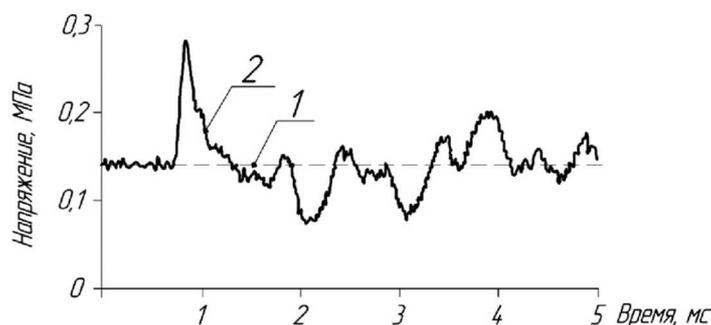
На рисунке 1 приведены результаты изменения сдвиговых усилий на гранях блочной структуры горных масс вызванные природными и техногенными причинами с накоплением амплитуды микросейсмических колебаний.

Динамика напряженного состояния блока горных масс при вибровоздействии периодическими импульсами, имитирующими ударное воздействие, приводят к накоплению макродеформаций на границе блоков (рис. 2).

Лабораторные исследования [9] при изучении процесса накопления макродеформаций в виде квазистационарного деформирования с малой скоростью деформации (рис. 2) показали, что начало вибровоздействия характеризуется изменением амплитуды колебаний деформирования контакта и характерно для тел с вязкоупругими свойствами. Вязкоупругие и вязкопластические модели применяются для описания сжатия мягких грунтов динамическими нагрузками большой интенсивности.



**Рисунок 1** – Результаты изменения сдвиговых усилий на гранях блочной структуры горных масс [9]:  
 1–5 участки превышения текущей прочности контакта,  $F_s$  – приложенная сдвиговая нагрузка (Н),  $F_{p1}$  – текущая прочность контакта (Н)



**Рисунок 2** – Результаты изменений динамики напряженного состояния блока горных масс при вибровоздействии [9]:  
 1 – уровень статических нормальных напряжений на гранях подвижного блока,  
 2 – кривая изменений статических и динамических напряжений

Из анализа кривой изменения напряжений (рис. 2) виден вначале резкий скачок деформации с постепенным его уменьшением. Экспериментами установлено главное подтверждение, ранее не принимаемой гипотезы, что небольшие амплитуды от вибровоздействия динамического характера приводят к необратимым процессам на межблоковых контактах.

Фундаментальным основанием волновой теории «слабых возмущений» в условиях динамических воздействий явились многолетние исследования волновых и колебательных процессов техники, оборудования и технологических процессов для многофазных сред выполненных научной школой академика Р.Ф. Ганиева в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Исследованиями многофазной среды «жидкость – твердые частицы» при разном характере распределения амплитуд волнового поля в призабойной зоне пласта удалось установить:

а) главные моменты возникающие в таких технологических процессах, которые отражают «формирование необходимых законов движения при наименьших энергетических затратах, но с сохранением максимальной производительности процесса. Создание такого рода движения во многих случаях можно выполнить наиболее эффективно, основываясь на мощных волновых или колебательных резонансных эффектах в многофазных средах» [10];

б) «создание необходимых управляемых движений многофазной системы или стабилизации ее равновесных состояний за счет управления малыми волновыми или колебательными процессами» [10], что может быть выполнено как с помощью внешних периодических воздействий (вибрация низко- и высокочастотного диапазона, ультразвук, переменные электрические и магнитные поля), так и с помощью аппаратного управления, где желаемые колебательные движения получаются за счет автоколебаний системы или пассивного управления пограничным слоем. Управление малыми колебаниями, с одной стороны, соответствует малым энергетическим затратам, а с другой стороны, позволяет существенно изменить динамические характеристики многофазной системы не всегда волной природы, т.е. «колебания порождают не только колебания, но и различные периодические и монотонные движения, ускорения и торможение движений, стабилизацию равновесных состояний и другие резонансные эффекты» [10]. Это порождает радикальную перекачку волновой энергии в энергию других форм механических движений, где «слабые возмущения», ранее не принимавшиеся во внимание, являются определяющими (главными) в многофазной системе;

в) колебательные движения в дисперсных средах обладают сильным избирательным действием на изменение ее состояния;



г) применение вибрации основанной на традиционных подходах, в которых рассмотрена динамика вибрационных машин как твердых тел, без учета свойств обрабатываемой многофазной среды не всегда обоснован, применим и оправдан. Исследования в строительстве, горном деле, металлургии вибрационных методов не совсем корректны для нефтегазового комплекса, водоканализационного хозяйства, хотя вибрация везде одинаковая;

д) механизм локальных эффектов движения твердых частиц, взвешенных в волновых полях сжимаемой среды, где характерны два режима движения частиц: одно происходит в направлении движения относительно несущей среды и связано оно с квазиравновесном положением частиц в волновом поле, другое может иметь место хаотической адвекции, что вызывает хаотическое разнонаправленное движение частиц, напоминающие импульсы и способные к перемешиванию среды.

Отмечая определяющую роль автоколебаний в процессе декольматации скважин через классификационные признаки, автор в работе [11] выделяет, что систему пласт-скважина можно перевести в термодинамически неустойчивое (критическое) состояние внешним воздействием от вибрации слабой интенсивности.

В другой работе [12] посвященной оценке состоянию среды с неустойчивым поведением с позиций детерминированного хаоса отмечена роль триггерных эффектов в системе пласт-скважина. Существование в неравновесных системах точек бифуркаций позволяет производить переход локальных областей системы от порядка к хаосу и наоборот в виде автоколебательных волн. Это позволяло неупорядочным волнам самоорганизовываться и имитировать среду с подпиткой импульса. Периодически возбуждаемая неравновесная локальная система может колебаться с периодом, полупериодом, четверть периодом, удвоенным периодом и т.д. от внешнего воздействия. Поэтому восприимчивость системы к «слабым возбуждениям» (почти из ничего) позволяет управлять процессом самоорганизации в нужном направлении.

### Выводы

1. Аппаратное физическое воздействие силовых акустических полей искусственно вызывает в неоднородных средах заполненных флюидом неустойчивое состояние системы пласт-скважина и позволяет управлять режимом катастроф.

2. Рассмотренными исследованиями специалистов объяснен механизм и экспериментально доказан факт преобразования слабых вибрационных колебаний в трансформацию изменения структуры горных масс (грунтов) с поступательным смещением частиц («акустическое разжижение»).

3. Работы исследователей (Н. Винер и А. Розенблют, 1946; Дж. Меллош, 1987; Г.Г. Кочарян и В.Н. Родионов, 1988; Кочаряна и А.Е. Федорова, 1990; Р.Ф. Ганиев и Л.И. Украинский, 2011; А.А. Цымбалов, 2012) показали возможность существования слабых волновых полей в возбудимых неоднородных средах заполненных флюидом и их применимость в технических процессах, включая околоскважинные среды.

*Работа выполнена в рамках Программы НИР ГК «Архимед» Arh. № ТЭР-R 642012-0001.000 «Исследование процессов кольматации околоскважинной среды и разработка методов декольматации водопропускных устройств: п.п. а–е; разд.1, разд. 2.» [13].*

### Литература:

1. Цымбалов А.А. Межремонтный период регенерации водозаборных скважин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2017. – № 10. – С. 20–25.

2. Цымбалов А.А. Метод наилучших доступных технологий в регенерации закольматированных водозаборных скважин // Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых : материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. – М. : РУДН, 2017. – Вып. 19. – С. 434–439.

3. Цымбалов А.А. Предпосылки к разработке метода ремонтно-восстановительных работ скважинных водозаборов в условиях биохимической кольматации // Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии : сб. науч. тр. химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. – М. : Макспресс, 2016. – С. 272–279.

4. Цымбалов А.А. Объяснение физических явлений и процессов декольматации околоскважинной зоны с применением математического моделирования // Приложение математики в экономических и технических исследованиях : сб. науч. тр. Магнитогорск. гос. техн. ун-та. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2017. – Т. 1. – № 7. – С. 199–204.

5. Цымбалов А.А. Методические подходы в решении прогностических задач по декольматации околоскважинных зон на основе математического моделирования // Приложение математики в экономических и технических исследованиях : сб. науч. тр. Магнитогорск. гос. техн. ун-та. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2017. – Т. 1. – № 7. – С. 204–210.

6. Цымбалов А.А. Выбор сочетаний наилучших доступных технологий в регенерации закольматированных скважин // Приложение математики в экономических и технических исследованиях : сб. науч. тр. Магнитогорск. гос. техн. ун-та. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2017. – Т. 1. – № 7. – С. 191–199.



7. Арнольд В.И. Теория катастроф. – М. : Наука, 1990. – 128 с.
8. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории и удара колебаний. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2015. – 272 с.
9. Кочарян Г.Г. Динамика деформирования блочных массивов горных пород / Г.Г. Кочарян, А.А. Спивак. – М. : ИКЦ Академкнига, 2003. – 423 с.
10. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. – М. : Институт компьютерных исследований; Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. – 780 с.
11. Цымбалов А.А. Метод интенсификации закольматированных скважин вибрационным воздействием // Создание эффективных средств механизации в строительных и дорожных отраслях : сб. науч. тр. Саратов. гос. техн. ун-та по материалам Всероссийской научно-технической конференции (г. Саратов, октябрь 2012 г.). – Саратов : СГТУ, 2013. – С. 76–81.
12. Цымбалов А.А. Научные подходы, экспериментальные и практические результаты механизма вибро-волнового воздействия на декольматацию скважин в зависимости от формализации реальных сред // Создание эффективных средств механизации в строительных и дорожных отраслях : сб. науч. тр. Саратов. гос. техн. ун-та по материалам Всероссийской научно-технической конференции (г. Саратов, октябрь 2012 г.). – Саратов : СГТУ, 2013. – С. 66–76.
13. Приоритетные НИР : Темы инновационных направлений научно-исследовательских работ ООО ГК «Архимед» / А.А. Цымбалов. – М., 2014–2019. – URL : <http://doktorsc.ru/index.php/prioritetnye-nir> (дата обращения 20.03.2019).

### References:

1. Tsymbalov A.A. Overhaul period of water wells regeneration / Water supply and sanitary engineering. – 2017. – № 10. – P. 20–25.
2. Tsymbalov A.A. Method of best available technologies in the regeneration kolmat wells // Sergeev readings. Geocological safety of mineral deposits development : materials of the annual session of the RAN Scientific Council on Geocology, engineering Geology and hydrogeology. – M. : RUDN, 2017. – Issue. 19. – P. 434–439.
3. Tsymbalov A.A. Prerequisites for the development of the method of repair and restoration works of well water intakes in the conditions of biochemical colmatation // Ozone and other environmentally friendly oxidizers. Science and technology : collection of scientific works. tr. chemical faculty of Moscow state University. M.V. Lomonosov. – M. : Makspress, 2016. – P. 272–279.
4. Tsymbalov A.A. Explanation of physical phenomena and processes of declimatize the borehole zone with the use of mathematical modeling // Application of mathematics in technical and economic studies : collection of scientific works. tr. Magnitogorsk. state tech. un-ta. – Magnitogorsk : Publishing house Magnitogorsk. state tech. un-ta, 2017. – V. 1. – № 7. – P. 199–204.
5. Tsymbalov A.A. Methodical approaches to the solution of the prognostic tasks of declimatize borehole zones on the basis of mathematical modeling // Application of mathematics in technical and economic studies : collection of scientific works. tr. Magnitogorsk. state tech. un-ta. – Magnitogorsk : Publishing house Magnitogorsk. state tech. un-ta, 2017. – V. 1. – № 7. – P. 204–210.
6. Tsymbalov A.A. The Choice of the best combinations of available technologies in the regeneration kolmat wells // Application of mathematics in technical and economic studies: collection of scientific works. tr. Magnitogorsk. state tech. un-ta. – Magnitogorsk : Publishing house Magnitogorsk. state tech. un-ta, 2017. – V. 1. – № 7. – P. 191–199.
7. Arnold V.I. Theory of catastrophes. – M. : Science, 1990. – 128 p.
8. Panovko J.G. fundamentals of applied theory and shock oscillations. – M. : Book house «LIBROKOM», 2015. – 272 p.
9. Kocharyan G.G., Dynamics of deformation of block rock masses / G.G. Kocharyan, A.A. Spivak. – M. : IKTS Akademkniga, 2003. – 423 p.
10. Ganiev R.F., Ukrainskiy L.E. Nonlinear wave mechanics and technologies. Wave and oscillatory phenomena are the basis of high technologies. – M. : Institute of computer research; scientific publishing center «Regular and chaotic dynamics», 2011. – 780 p.
11. Tsymbalov A.A. Intensification Method kolmat wells vibration // The Establishment of an effective mechanization in the construction and road industries : scientific collection. tr. Sarat. state tech. un-ta based on the materials of the all-Russian scientific and technical conference (Saratov, October 2012). – Saratov : SGTU, 2013. – P. 76–81.
12. Tsymbalov A.A. Scientific approaches, experimental and practical results mechanism vibromassage impact on declimatize wells, depending on the formalization of real-world environments // Creating an effective mechanization in the construction and road industries : scientific collection. tr. Sarat. state tech. un-ta based on the materials of the all-Russian scientific and technical conference (Saratov, October 2012). – Saratov : SGTU, 2013. – P. 66–76.
13. Priority research : Topics and innovative areas of scientific research, ООО ГК «Архимед» / А.А. Tsymbalov. – М., 2014–2019. – URL : <http://doktorsc.ru/index.php/prioritetnye-nir> (accessed 20.03.2019).