Казанский Федеральный Университет

Кафедра технологии нефти, газа и углеродных материалов

Kazan Federal University,

Department of oil & gas technology and carbon materials

Семинар диссертационной работы Ассима Алфаяда Гани Хашима по теме «Волновая технология в процессе нефтеизвлечения на поздней стадии разработки», на соискание степени кандидата технических наук по направлению «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»

Seminar of the dissertation work of Assim Alfayad Ghani Hashim on the topic "Wave technology in the process of oil extraction at a late stage of development", for the degree of candidate of technical sciences in the direction of "Development and operation of oil and gas fields"

Алфаяад Ассим Гани Хашим, Alfayyadh Assim Gheni Hashim [1]

Кемалов Руслан Алимович, Kemalov Ruslan Alimovich [2]

Кемалов Алим Фейзрахманович, Kemalov Alim Feizrahmanovich [3]

аспирант кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов [1]

кандидат технических наук,

доцент кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов [2] ,

доктор технических наук, профессор, академик РАЕН [3]

заведующий кафедрой технологии нефти, газа и углеродных материалов

Казань, Россия

УДК 665.5-405. Шифр научной специальности ВАК:

2.8.4 Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

E-mail: assemalfayad@gmail.com[1] , kemalov@mail.ru[2] , alim.kemalov@mail.ru[3]

Аннотация: В статье будет отмечено, что 23 апреля 2024 года кафедра технологии нефти, газа и углеродных материалов КФУ провела семинар (протокол № 12 от 23 апреля 24), посвященный обсуждению диссертации аспиранта Ассима

Гани на тему " Волновая технология в процессе нефтеизвлечения на поздней стадии разработки". Научным руководителем работы выступил доцент Кемалов Руслан Алимович, который подчеркнул значимость исследования для современной нефтедобычи, особенно в контексте высоковязких нефтей. Семинар длился около двух часов, в ходе которого были рассмотрены ключевые аспекты диссертации, включая сильные и слабые стороны работы, а также подготовка к будущей защите и презентации результатов.

Кроме того, заведующий кафедрой технологии нефти, газа и углеродных материалов, профессор Кемалов А.Ф., отметил, что работа аспиранта Ассима значительно расширяет понимание процессов воздействия акустики на свойства нефти и проницаемость продуктивного пласта. Также было отмечено, что хотя основные научные положения, описывающие физические основы воздействия акустики на нефть и пласты, уже известны, недостаточно исследований посвящено применению этих методов для решения конкретных задач добычи. Эти комментарии подчеркивают важность и актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы.

В заключение семинара было выражено общее мнение о высоком потенциале предложенной технологии и необходимости продолжения исследований в данном направлении. Участники семинара подчеркнули значимость работы для развития отрасли и возможности ее практического применения для повышения эффективности добычи нефти.

Abstract: The article will note that on April 23, 2024, the Department of Technology of Oil, Gas and Carbon Materials of KFU held a seminar dedicated to discussing the dissertation of graduate student Assim Ghani on the topic “Application of wave technologies in the process of late stage oil recovery.” The scientific supervisor of the work was Associate Professor Ruslan Alimovich Kemalov, who emphasized the significance of the research for modern oil production, especially in the context of high-viscosity oils. The

seminar lasted about two hours, during which key aspects of the dissertation were reviewed, including strengths and weaknesses of the work, as well as preparation for future defense and presentation of results.

In addition, the head of the department of technology of oil, gas and carbon materials, Professor A.F. Kemalov, noted that the work of graduate student Assim significantly expands the understanding of the processes of the influence of acoustics on the properties of oil and the permeability of the productive formation. It was also noted that although the basic scientific principles describing the physical basis of the impact of acoustics on oil and reservoirs are already known, not enough research has been devoted to the application of these methods to solve specific production problems. These comments highlight the importance and relevance of the research conducted as part of the dissertation work.

At the conclusion of the seminar, a general opinion was expressed about the high potential of the proposed technology and the need to continue research in this direction. The seminar participants emphasized the significance of the work for the development of the industry and the possibility of its practical application to increase the efficiency of oil production.

Ключевые слова: семинар, диссертационной работы**,** импульсно-волновое воздействие, призабойная зона пласта, волновые методы, скважина, фильтрация, асфальтосмолопарафиновые отложения.

Keywords: seminar, dissertation work, pulse-wave impact, bottomhole formation zone, wave methods, well, filtration, asphalt-resin-paraffin deposits.

1. ВВЕДЕНИЕ (INTRODUCTION)

В современном мире нефтедобыча играет ключевую роль в обеспечении энергетической безопасности и экономического развития. Однако, с увеличением

доли поздних стадий разработки месторождений, сталкиваемся с вызовами, связанными с уменьшением дебита скважин и сложностью извлечения высоковязких нефтей. В этом контексте волновая технология представляет собой перспективное направление, способное значительно повысить эффективность процесса добычи.

Исследование, посвященное обоснованию и оценке применения волновой технологии в нефтеизвлечении на поздней стадии разработки месторождений, представляет собой значимый шаг в направлении оптимизации процессов нефтедобычи. Анализ воздействия акустики на свойства нефти и продуктивного пласта открывает новые перспективы для увеличения добычи и снижения затрат [1-

Данная тема не только актуальна для современной нефтяной индустрии, но и имеет потенциал для практического применения, способствуя развитию новых технологий и методов улучшения процессов добычи нефти. Результаты и выводы исследования могут стать основой для разработки инновационных подходов в области нефтедобычи и повышения эффективности работы месторождений на поздних этапах их развития. Основное внимание уделено обоснованию применения волновой технологии для увеличения эффективности извлечения нефти на поздних стадиях разработки месторождений. Профессор Кемалов отметил, что работа аспиранта Гани значительно расширяет понимание процессов воздействия акустики на свойства нефти и проницаемость продуктивного пласта.

Также было отмечено, что хотя основные научные положения, описывающие физические основы воздействия акустики на нефть и пласты, уже известны, недостаточно исследований посвящено применению этих методов для решения конкретных задач добычи. В связи с этим, диссертация Алфаяада Ассима Гани представляет собой важный шаг в направлении дальнейших исследований и разработок в области волновых технологий в нефтедобыче.

Место проведения заседания: г. Казань, ул. Салиха Сайдашева 12, корпус 3, Инженерно-лабораторный корпус КФУ, ауд. 401

Протокол № 12 от 22 марта 2023 года

Присутствовало от кафедры ТНГ и УМ - 10 чел:

профессор: Кемалов А.Ф.

доцент: Кемалов Р.А.

старшие преподаватели: Валиев Д.З., Брызгалов Н.Г.

зав. лабораторией: Бурганова Л.Ф.

специалист по УМР: Газизова Г.И.

аспиранты: Риффель Д.В., Алмохамад А.М., Ахметзянов Р.Р.

магистранты: Алаббас И.С.

Слушали: доклад **Алфаяад А.Г.Х.,** в котором были изложены актуальность темы, исследования, цель и задачи, основное содержание и полученные результаты диссертационной работы (текст доклада прилагается)

После доклада были заданы следующие вопросы:

1. В чем новизна вашей работы?
2. Как влияет воздействие волн на вязкость нефти?
3. Каков механизм работы продленного метода в научных исследованиях для диссертации?
4. Как влияет воздействие волн на проницаемость нефтяных пластов?
5. Какие методы исследования применяются для изучения изменений в проницаемости нефти под воздействием волн?
6. Какова структура работы в диссертации, посвященной воздействию волн на нефтяные свойства?
7. Какие основные разделы и главы включены в структуру диссертации по этой теме?

8. Какие источники литературы рассматриваются в диссертации для обоснования исследования влияния волн на свойства нефти?

9. Какие публикации, статьи и научные работы рассматриваются в качестве основы для исследования воздействия волн на нефть?

10. Какие методы и техники анализа используются для интерпретации результатов исследования влияния волн на нефтяные свойства?

11. Какие теоретические основы лежат в основе работы по изучению воздействия волн на нефть, и как они применяются в диссертации?

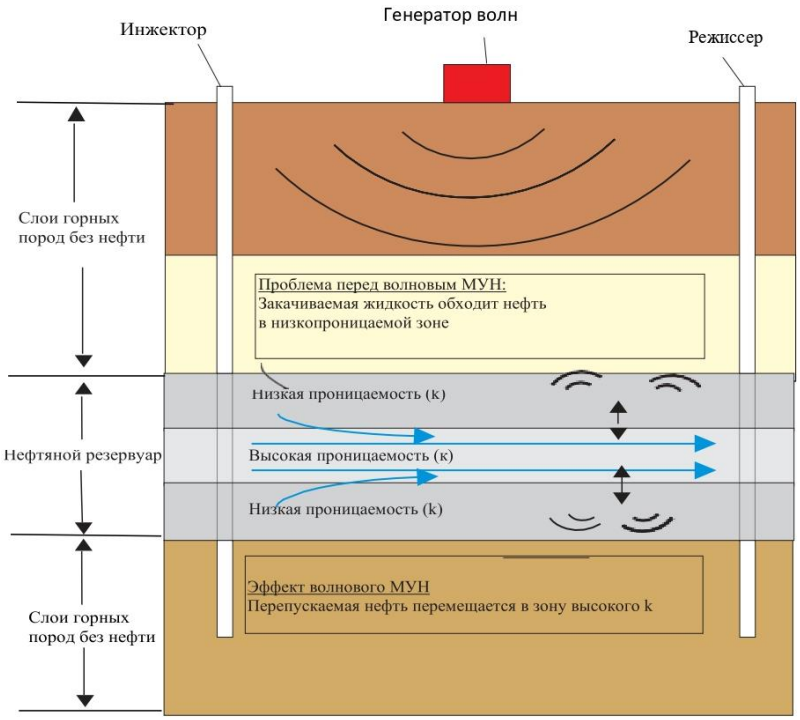
В статье будут представлены основные обсуждения и содержание диссертации, посвященной применению волновой технологии в нефтеизвлечении на поздней стадии разработки месторождений. Исследование этой темы представляет собой значимый шаг в направлении оптимизации процессов нефтедобычи, а также открывает новые возможности для развития инновационных подходов в области добычи нефти на поздних этапах разработки месторождений. Результаты и выводы данного исследования могут послужить основой для создания эффективных методов улучшения работы месторождений и повышения эффективности нефтяной промышленности.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (MATERIALS AND METHODS)

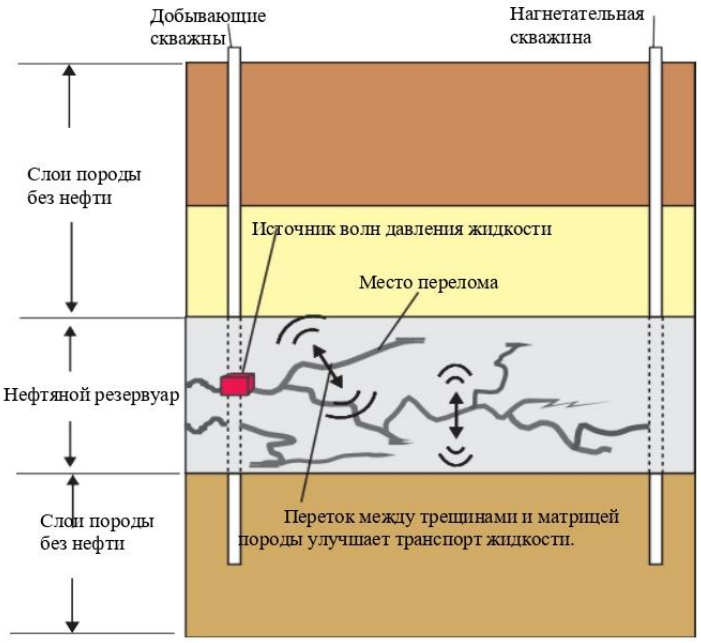
Потенциал волнового увеличения нефтеотдачи подтверждается рядом полевых наблюдений, которые показывают, что упругие волны вызывают увеличение добычи оставшейся нефти. Например, было замечено, что скорость добычи нефти и/или коэффициент обводненности нефти увеличивается во время и после сейсмических событий в нефтяных резервуарах, расположенных в более широком регионе, пострадавшем от землетрясения [1]. Об увеличении добычи нефти также сообщалось в ходе полевых экспериментов, проведенных с источниками волн, расположенными на поверхности земли или внутри ствола скважины, как на

действующих, так и на кажущихся истощенными нефтяных месторождениях [2].

Помимо полевых данных, были также проведены лабораторные исследования основных механизмов волнового МУН. Утверждалось, что встряхивание пласта может привести к поперечным колебаниям потока на границе между областями с низкой и высокой проницаемостью в сильно неоднородных коллекторах или в трещиноватых коллекторах. Например, в неоднородном коллекторе упругие волны вызывают колебания порового давления между слоями с различной проницаемостью (рис. 1(а)). Аналогичным образом, в трещиноватом коллекторе (рис. 1(б)) прямое воздействие источников гидравлических волн на трещину может вызвать периодический градиент давления между трещиной и окружающей матрицей породы [4].



(а) Упругая волна вызывает поперечные колебания на границе раздела между различными областями проницаемости.



(б) Скважинные гидравлические насосы вызывают поперечные колебания на границе раздела пространства трещины и окружающей матрицы породы.

Рисунок 1 - Механизм восстановления, основанный на поперечных колебаниях, вызванных волнами

С другой стороны, было высказано предположение, что сейсмические волны увеличивают проницаемость углеводородных пластов. В работе [4] сообщили, что сейсмические волны могут изменить проницаемость водоносных горизонтов, исследуя вызванные землетрясением фазовые изменения реакции уровней воды в скважинах на земные приливные деформации. В работе [5] также представили, что проницаемость трещиноватых пород можно повысить с помощью лабораторных испытаний, в которых используются колебания потока жидкости очень низкой частоты (0,05 Гц). Сообщается, что разблокирование пор путем разрушения коллоидных отложений или мобилизации капель, захваченных в порах, связано с волновым изменением проницаемости в системах горных пород [4] также предложили модель изменения проницаемости пористых проницаемых горных пород, которая объясняет увеличение проницаемости во время сейсмической

активности с последующим ее снижением из-за повторного закупоривания пор.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ (RESULTS AND ITS DISCUSSION)

3. Общие сведения

3.1 Обзор различных исследований применения акустического воздействия для повышения нефтеотдачи

В Таблице 1 сравнивается добыча до и после использования этой технологии на различных блоках месторождений в РФ и за рубежом. Из таблицы видно, что после принятия мер по увеличению производительности с помощью ультразвука в разной степени увеличилась производительность каждого блока. На рисунке 2 представлена гистограмма, сравнивающая рост добычи в каждом блоке до и после использования этой технологии. Применение технологии ультразвуковой стимуляции добычи на блоке нефтяного месторождения Дацин позволило увеличить добычу примерно в 3,5 раза, что доказывает, что ультразвуковая технология может эффективно способствовать добыче и эффективности нефтяных месторождений.

Таблица 1. Сравнение добычи нефти до и после ультразвуковой обработки в разных месторождениях

Место производства	Частота (кГц)	Мощность (кВт)	Исходный	Добыча после ультразвуковой обработки, бар/день
Демкинское нефтяное месторождение, Россия [30]				
Нефтяное месторождение Чжунюань, Китай [28]				
Нефтяное месторождение Шэнли, Китай				
Самарская область, Россия [26]	15–30			
Нефтяные месторождения на севере провинции Шэньси, Китай [22]	5–30			

Нефтяное месторождение Яньчан, Китай				
Западно-Сибирский регион, Россия [26]	15–30			
Самотлорское нефтяное месторождение, Россия [27]		18–27		
Нефтяное месторождение Дацин, Китай				

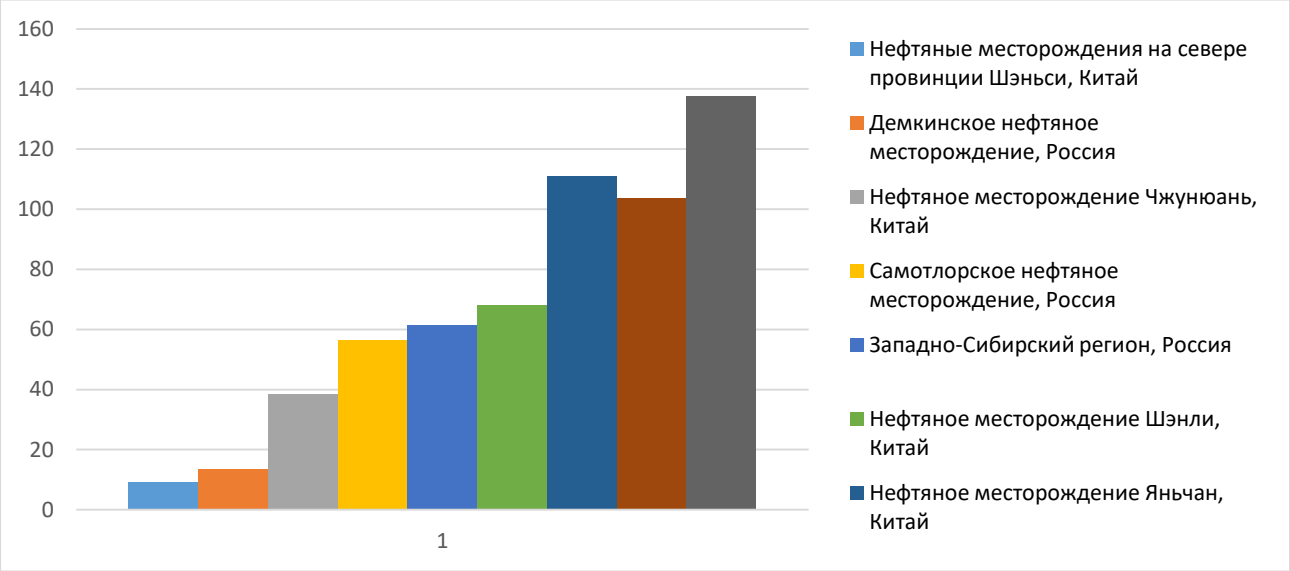


Рисунок 2 - Темпы роста добычи после применения ультразвука на разных месторождениях

Влияние акустических параметров и свойств среды на акустическую кавитацию

Одним из эффектов, наблюдаемых в предыдущем экспериментальном исследовании в акустическом поле с интенсивностью 8-100 кВт/м², является изменение вязкости свободной нефти. Снижение вязкости достигает 20-30% и объясняется разрушением циклических структур за счет интенсивных колебательных процессов, а также нагревом нефти и содержащихся в ней парафинов, вызванным диссипацией акустической энергии.

Другим эффектом являются акустические течения в жидкости, причина которых заключается в передаче поглощающей среде импульса волны, приводящего жидкость в движение, которое носит вихревой характер. В зависимости от

направления волны и скорости жидкости, фильтрующейся под действием градиента гидростатического давления, скорость может увеличиваться или снижаться. Экспериментальные исследования на моделях с пористостью 32% при интенсивности 0,1 Вт/см² подтвердили существование такого эффекта. Расчеты для продольной волны, распространяющейся в насыщенной нефтью пористой среде, показали возникновение акустического потока [6].

При распространении акустических волн в насыщенной пористой среде увеличивается ее эффективная теплопроводность. Акустическая кавитация жидкости, находящейся при давлении, превышающем давление насыщения, связана с наличием в ней газовых пузырьков-зародышей. Пульсации стенок пузырьков могут привести к их росту в результате так называемой выпрямленной диффузии. Пузырьки, достигшие определенного максимального размера, схлопываются, что приводит к возникновению ударных волн, способствующих перемешиванию жидкости и очистке пор, а иногда — к увеличению пористости за счет разрушения матрицы.

Установлено, однако, что явление выпрямленной диффузии и кавитация возникают при достижении акустическим давлением определенной пороговой величины. Для свободных жидкостей, находящихся при давлении выше давления насыщения, этот порог достигает десятков и сотен атмосфер и в реальных условиях практически недостижим.

В таблице будет представлен эффект от распространения звуковых волн в пористой среде. Акустические параметры, такие как частота, интенсивность звука, время обработки и тип поля, являются основными параметрами, определяющими акустическую кавитацию. Среди основных свойств среды, влияющих на акустическую кавитацию, можно выделить вязкость, межфазное натяжение, давление насыщенного пара, растворенный газ и пористость твердого тела.

1.1 Акустические параметры частота, интенсивность звука, время обработки и тип поля являются основными параметрами, определяющими акустическую кавитацию.	**1.2 Средние свойства к свойствам среды, определяющим акустическую кавитацию, относятся вязкость, межфазное натяжение, давление насыщенного пара, растворенный газ и пористость твердого тела.**
1. Увеличение частоты увеличивает порог кавитации, препятствуя зарождению пузырьков [18]. Кроме того, количество пузырьков увеличивается, а средний размер пузырьков уменьшается.	**1.** Высокая вязкость способствует отрицательному давлению в фазе расширения, тем самым повышая порог кавитации [10].
2. Увеличение интенсивности звука приводит к увеличению амплитуды акустического давления, вызывая более сильные колебания пузырьков [19].	**2.** Увеличение межфазного натяжения снижает скорость зарождения пузырька, но увеличивает интенсивность взрыва пузыря [21].
3. Температура жидкости увеличивается со временем обработки, снижая порог кавитации [20].	**3.** Увеличение давления насыщенного пара способствует акустической кавитации, поскольку количество пара внутри пузыря увеличивается [10].
4. Акустическая кавитация более выражена в поле стоячей волны, чем в поле бегущей волны [10].	**4.** Зарождению пузырьков способствует газ, растворенный в среде, что приводит к снижению порога кавитации [22].
-	**5.** Источником кавитации может быть газ, захваченный в зазорах и отверстиях твердого тела [22].

3.3 Акустическая кавитация и кавитационный порог

Ультразвук представляет собой механическую волну с колебаниями давления, которая может проходить через газообразные, жидкие и твердые среды [9]. В частности, мощный ультразвук может передавать в среду высокую удельную плотность энергии и вызывать интенсивную акустическую кавитацию, которая затем приводит к высоким температурам и давлениям, а также к механическим воздействиям (ударные волны, микроструи и сдвиговые силы). Эти эффекты связаны с эволюцией кавитационных пузырьков. Под действием ультразвука среда подвергается циклу расширения и сжатия под давлением.

Физические и химические эффекты акустической кавитации определяются динамикой пузырьков. Как показано в рисунок 3, эволюция кавитационного пузыря

в колеблющемся поле давления имеет две стадии: расширение и схлопывание. Когда пузырь достигает нестабильных размеров, он взрывается и вызывает ряд физических и химических явлений. Радиальная динамика пузырька описывается уравнением Келлера-Миксиса [11] :

$$\left(1-\dot{\mathrm{M}}\right)R\ddot{R}+\frac{3}{2}\left(1-\frac{\dot{\mathrm{M}}}{3}\right)\dot{R}^2=\frac{1+\dot{\mathrm{M}}}{\rho_L}+\frac{R}{\rho_L C}\frac{d}{dt}\left[\mathrm{P}_B-P_\infty-\mathrm{P}_\omega\right] \qquad (1)$$

где M — число Маха, эквивалентное R/c ; R — радиус пузырька; c — скорость звука; ρ_{L} — плотность жидкости; P_{B} – давление в пузырьке; P_{∞} – статическое гидравлическое давление; P_{W} – амплитуда акустического давления.

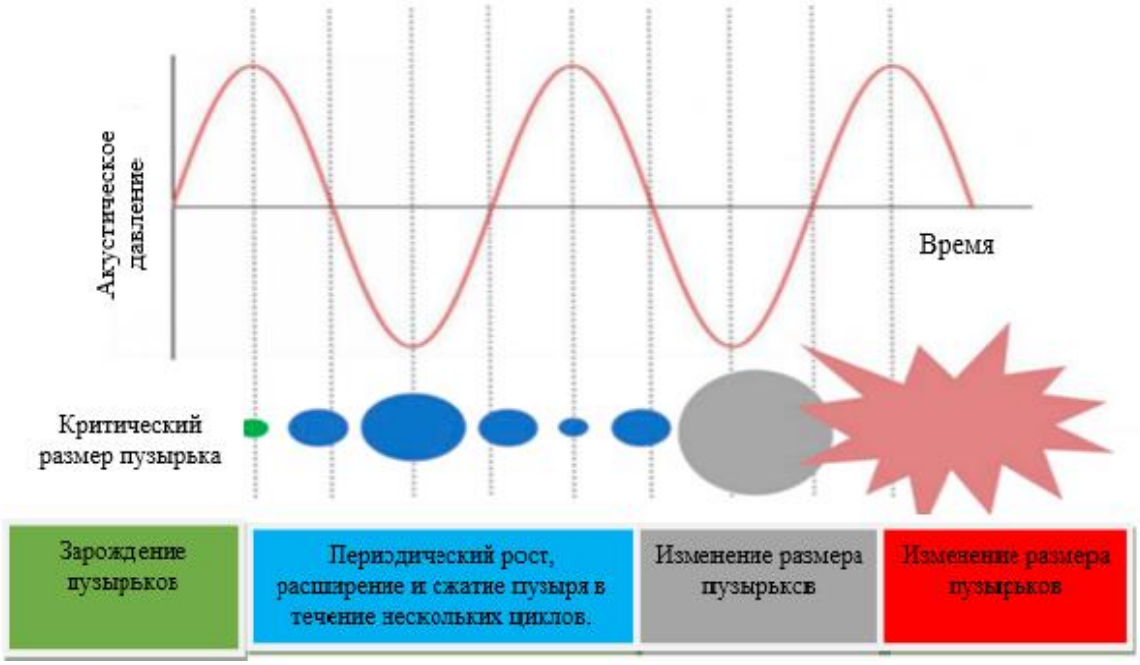


Рисунок 3 – Эволюция кавитационного пузырька при колебаниях звукового давления

Во время фазы отрицательного давления зародышевый пузырек расширяется и достигает максимального радиуса $R_{\max}$ в конце расширения. Температура внутри расширяющегося пузыря остается постоянной при отсутствии химических реакций. Давление внутри пузырька уменьшается и достигает минимума в конце

расширения. Температура T и давление P_{B} внутри пузырька при расширении определяются выражением [12]:

$$T = T_{\infty} = \text{cte} \tag{1}$$

$$\text{P}_B = \text{P}_V + \left(\text{P}_0 + \frac{2\alpha}{R_0} - \text{P}_V \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \tag{2}$$

где T — температура в пузырьке; T_{∞} – температура жидкости; P_{V} — давление паров жидкости; σ — поверхностное натяжение жидкости; R_0 — окружающий радиус пузырька.

Во время фазы положительного давления кавитационные пузырьки быстро схлопываются, что сопровождается рядом физических и химических явлений. Этот процесс происходит в адиабатическом состоянии, так как чрезвычайно короткое время схлопывания тормозит теплообмен внутри и снаружи пузырька. Температура и давление внутри пузыря увеличиваются по мере уменьшения размера пузыря [13]. Когда радиус пузырька достигает минимального радиуса R_{min}, внутри сжатого пузыря может быть достигнута температура около 5000 К и давление около 2000 атмосфер. Такая высокая температура вызывает сложную серию элементарных реакций, в результате которых образуются различные окислители. В заключение, высокая температура, высокое давление и окисление вызывают сонохимические реакции. Температура Tи давление P_{B} внутри пузырька при схлопывании определяются выражением [12]:

$$T = T_{\infty} = \left(\frac{R_{\max}}{R} \right)^{3(\gamma - 1)} \tag{3}$$

$$\text{P}_B = \left(\text{P}_V + \left(\text{P}_0 + \frac{2\alpha}{R_0} - \text{P}_V \right) \left(\frac{R_0}{R_{\max}} \right)^3 \right) \left(\frac{R_0}{R_{\max}} \right)^{3\gamma} \tag{4}$$

где $R_{\max}$ — максимальный радиус пузырька; γ – коэффициент адиабаты.

Радиус пузырька R_0 при нулевом мгновенном акустическом давлении представляет собой окружающий радиус, также известный как равновесный

радиус. Равновесный радиус R_0 отражает средний радиус пузырьков на данной частоте. При схлопывании радиус кавитационного пузыря уменьшается от максимального до минимального. Степень сжатия R_{max} / R_{min} определена как ключевой параметр, влияющий на интенсивность кавитации [11]. Как максимальная температура, так и давление, достигаемые внутри пузыря в конце схлопывания, увеличиваются с увеличением степени сжатия. Более того, максимальная температура увеличивается линейно, а максимальное давление увеличивается экспоненциально с увеличением степени сжатия. Степень сжатия также используется, чтобы отличить активные пузырьки от неактивных [14]. Как уменьшение частоты, так и увеличение интенсивности звука могут эффективно увеличить степень сжатия, усиливая акустическую кавитацию [10].

Методика исследования

3.4.1 Моделирование и имитация метода акустического воздействия на скважину

В этом разделе представлены разработанная математическая модель и численная методика, которые позволяют определить оптимальные частоты излучения для достижения максимальной передачи энергии от преобразователя к горной породе.

Представлена методика поиска оптимальных частот выбросов для заданной конфигурации скважины. Предлагаемая модель основана на уравнении Гельмгольца, жестком граничном условии на обсадной колонне и импедансном граничном условии, которое эффективно учитывает взаимодействие пористого твердого тела и жидкости на границе раздела горной породы и перфораций скважины. Точные неотражающие граничные условия, полученные на основе карт Дирихле-Неймана, используются для усечения круглых цилиндрических волноводов, рассматриваемых в модели.

Полученная краевая задача затем решается численно с помощью метода конечных элементов. Представлены разнообразные численные примеры, демонстрирующие эффективность предложенной процедуры поиска оптимальных частот излучения.

Модель перфорированной скважины, используемая в этой разделе, соответствует локально возмущенному круговому цилиндру, определяемому как $\Omega w = \Omega p \cup \Omega+ \cup \Omega-$. Граница между перфорированной и верхней (соответственно нижней) цилиндрическими областями обозначается $\Gamma+$ (соответственно $\Gamma-$). Наконец, предполагается, что преобразователь (источник) занимает ограниченную область $\Omega s \subset \Omega p$ с границей $\partial\Omega s = \Gamma s$. Мы обращаемся к рис. 4 для определения всех соответствующих областей, рассматриваемых в математической модели.

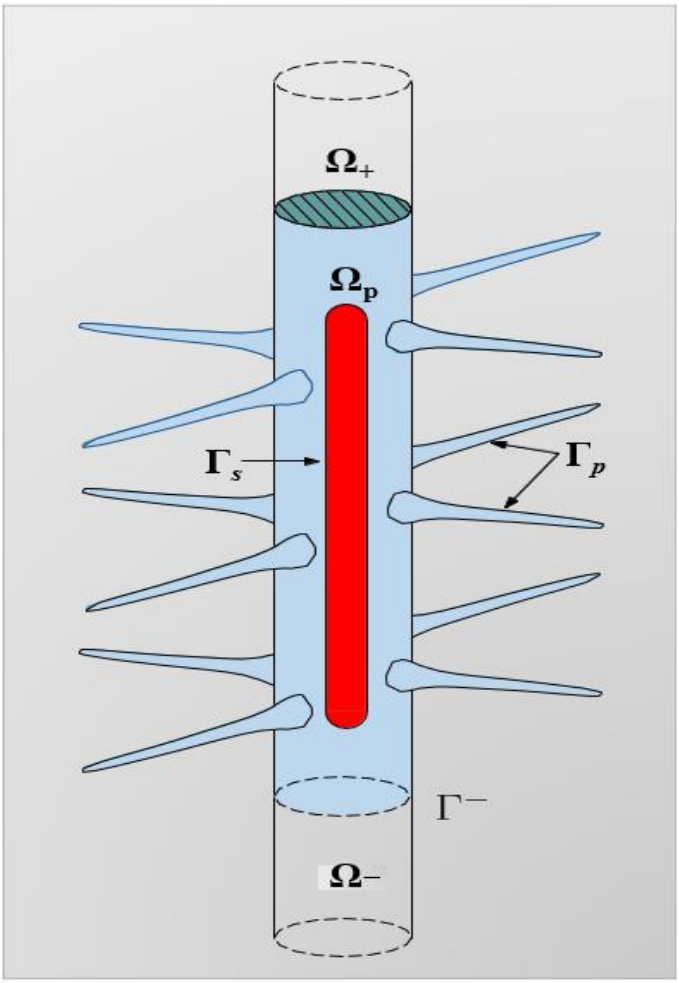


Рисунок 4 - Геометрическое описание перфорированной скважины и преобразователя

Где:

- Ωw - вся скважина, включая перфорированные и неперфорированные части;

- Ωp - перфорированная часть скважины с отверстиями для добычи;

- Ω+ и Ω− - цилиндрические области выше и ниже перфорированной части, без отверстий;

- Γ+ и Γ− - границы между перфорированной частью и неперфорированными областями;

- Ωs - область с преобразователем внутри перфорированной части;

- ∂Ωs = Γs - граница области преобразователя.

3.5 Численное моделирование

На рис. 5 показан объединенный коэффициент передачи энергии Q как функция частоты возбуждения f = ω/(2π) для трех конфигураций скважин,

Рисунок 5 - Объединенный коэффициент передачи энергии Q как функция частоты для трех «симметричных» конфигураций скважин

В этом численном моделировании преобразователь размещается точно в точке центр перфорированного домена. Острые пики коэффициента передачи энергии Q, многие из которых достигают значений, близких к верхней границе Q = 1, наблюдаются на различных частотах для рассматриваемых конфигураций скважин (например, значения пиков в районе f = 0,895, 1,585, 2,79, 3,695 и 5,525 кГц). Существование этих пиков объясняется резонансными явлениями, происходящими внутри перфорационных отверстий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (CONCLUSION)

В заключение семинара было выражено общее мнение о высоком потенциале предложенной технологии и необходимости продолжения исследований в данном направлении. Участники семинара подчеркнули значимость работы для развития отрасли и возможности ее практического применения для повышения эффективности добычи нефти.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ (CONFLICT OF INTEREST)

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES):

1. Alfayyadh Assim G.H., Kemalov R.A., Kemalov A.F. Wave technologies for intensifying oil and gas extraction for fields at a late stage of development // E3S Web of Conferences 463, 03007 (2023), URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346303007

2. Алфаяад А.Г.Х., Кемалов Р.А. Анализ волнового воздействияна изменение реологических характеристик тяжелой нефти // Технологии нефти и газа. 2022. № 2 (139). С. 55-58.
3. Алфаяад А.Г, Кемалов Р.А., Кемалов А.Ф. Анализ метода импульсно-волнового воздействия на призабойную зону пласта // Природные энергоносители и углеродные материалы & Natural energy sources and carbon materials. – 2024. – № 03; URL: energy-sources.esrae.ru/ru/67-234 (дата обращения: 28.04.2024).
4. Khudin M.V., Karpash O.M. Analysis of the current state of methods and means of increasing the productivity of oil wells by pulse-wave actions in reservoirs, Oil and gas engineering, 2013, issue 1, pp. 89–97.
5. Умарбеков Р.О. Технологии и реагенты, применяемые для интенсификации притока газа // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2020. № 4. С. 49–58.
6. Муллакаев, М. С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и грунтов: Дис. … докт. техн. наук : 03.02.08 / Муллакаев, Марат Салаватович; науч. рук. О. Н. Ильина; – М.: 2011. –391 с.
7. Agi A., Radzuan J., Ramin S., Afeez O.G. Comparative study of ultrasound assisted water and surfactant flooding // Journal of King Saud University. — 2019. — N. 31(3). — P. 296–303.
8. Agi A., Junin R., Chong A.S. Intermittent ultrasonic wave to improve oil recovery // Journal of Petroleum Science and Engineering. — 2018. — N 166. — P. 577–591.
9. Ghamartale A., Escrochi M., Riazi M., Faghih A. Experimental investigation of ultrasonic treatment effectiveness on pore structure // Ultrasonics Sonochemistry. — 2019. — N 51. — P. 305–314.

10. He S., Hu X., Tan Xi., Gao Y. Effect of ultrasound on oil recovery from crude oil containing sludge // Environmental Technology. — 2019. — N 40(11). — P. 1401–1407.
11. Mohammadian E., Parak M., Babakhani P. The Effects of Properties of Waves on the Recovery of Ultrasonic Stimulated Waterflooding // Petrol Sci Technol. — 2014. — N 32(8). — P. 1000–1008.
12. Wang Z., Huang J. Research on removing reservoir core water sensitivity using the method of ultrasound-chemical agent for enhanced oil recovery // Ultrasonics Sonochemistry. — 2018. — N 42. — P. 754–758.
13. Khan N., Pu C., Jingyang P., Li X. Comparison of Acidizing and Ultrasonic Waves, and Their Synergetic Effect for the Mitigation of Inorganic Plugs // Energy & Fuels. — 2017. — N 31(10). — P. 11134–11145.
14. Wang Z., Xu Y., Gu Y. Lithium niobate ultrasonic transducer design for Enhanced Oil Recovery // Ultrasonics Sonochemistry. — 2015. — N 27. P. 171–177.
15. Aliev F., Mukhamatdinov I., Kemalov A., The, influences of ultrasound waves on rheological and physico-chemical properties of extra heavy oil from “ASHALCHA” field // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. — 2017. — N 17(14). — P. 941–948.
16. Rahimi M. A., Alijanvand H.A., Ramazani A. Effect of ultrasonic irradiation treatment on rheological behaviour of extra heavy crude oil: A solution method for transportation improvement // The Canadian Journal of Chemical Engineering. — 2017. — N 95(1). — P. 83–91.
17. Naderi K., Babadagli T. Influence of intensity and frequency of ultrasonic waves on capillary interaction and oil recovery from different rock types // Ultrasonics Sonochemistry. — 2010. — N 17(3). — P. 500–508.