УДК 622.276.66

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ИМПУЛЬСНОГО ГРП ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ КОЛЛЕКТОРОВ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ И ДОМАНИКОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

♦♦♦♦♦

JUSTIFICATION OF THE APPLICABILITY OF PULSE HYDRAULIC FRACTURING FOR THE DEVELOPMENT OF LOW-PERMEABILITY RESERVOIRS IN THE BAZHENOV FORMATION AND DOMANIK DEPOSITS

Хамиди Алан Ренатович
аспирант,
Институт геологии и нефтегазовых технологий
Казанского (Приволжского) федерального университета;
ведущий технолог
ООО «Промышленная Химия» ГК Миррико
khamidi.alan@mail.ru

Маннанов Ильдар Илгизович
кандидат технических наук,
доцент кафедры разработка и эксплуатация
месторождений трудноизвлекаемых углеводородов,
Институт геологии и нефтегазовых технологий
Казанского (Приволжского) федерального университета
ildarmannanov@mail.ru

Фомина Виктория Михайловна
магистрант,
Казанский национальный исследовательский
технологический университет
vfmnnn@gmail.com

Андрияшин Виталий Владимирович
кандидат химических наук,
Институт геологии и нефтегазовых технологий
Казанского (Приволжского) федерального университета
vandriya@kpfu.ru

Варфоломеев Михаил Алексеевич
кандидат химических наук,
заведующий кафедрой разработка и эксплуатация
месторождений трудноизвлекаемых углеводородов,
Институт геологии и нефтегазовых технологий
Казанского (Приволжского) федерального университета
mikhail.varfolomeev@kpfu.ru

Khamidi Alan Renatovich
Graduate Student,
Institute of Geology and Oil
and Gas Technologies
of Kazan (Volga Region)
Federal University;
Lead technologist LLC «Industrial
Chemistry», Mirriko Group of Companies
khamidi.alan@mail.ru

Mannanov Ildar Ilgizovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department
of Development and Operation
of Hard-to-Recover Hydrocarbon Fields,
Institute of Geology and Oil
and Gas Technologies
of Kazan (Volga Region)
Federal University
ildarmannanov@mail.ru

Fomina Victoria Mikhailovna
Master's Student,
Kazan National Research
Technological University
vfmnnn@gmail.com

Andriyashin Vitaly Vladimirovich
Candidate of Chemical Sciences,
Institute of Geology and Oil
and Gas Technologies
of Kazan (Volga Region)
Federal University
vandriya@kpfu.ru

Varfolomeev Mikhail Alekseevich
Candidate of Chemical Sciences,
Head of the Department of Development
and Operation of Hard-to-Recover
Hydrocarbon Deposits,
Institute of Geology and Oil
and Gas Technologies
of Kazan (Volga Region)
Federal University
mikhail.varfolomeev@kpfu.ru

Аннотация. В работе обоснована применимость импульсного гидравлического разрыва пласта (ГРП) для интенсификации разработки низкопроницаемых нефтематеринских толщ. Рассмотрены механизмы циклического нагружения, включая накопление усталостных повреждений, снижение давления инициирования трещин и вовлечение естественной трещиноватости. На основе лабораторных, численных и промысловых данных изучены возможные области, а также ограничения применения технологии импульсного ГРП применительно к объектам нетрадиционных коллекторов Баженовской свиты и Доманиковых отложений. Показано, что импульсное воздействие целесооб-

Annotation. This paper substantiates the applicability of pulse hydraulic fracturing for stimulating the development of low-permeability source-rock formations. It examines mechanisms of cyclic loading, including fatigue damage accumulation, reduction of fracture initiation pressure, and the activation of natural fractures. Drawing on laboratory, numerical, and field data, the study investigates the potential applications and limitations of pulse hydraulic fracturing technology for unconventional reservoirs within the Bazhenov and Domanik formations. It is demonstrated that pulse-based stimulation should not

разно использовать не как универсальную замену многостадийному гидравлическому разрыву пласта, а как элемент гибридного дизайна. Импульсный режим закачки жидкости перспективен с точки зрения предварительного циклического нагружения, кратковременной модуляции подачи в начале операции и мини-ГРП. Сформулированы требования к геомеханическому обоснованию, подбору частоты и амплитуды импульсов, а также контролю роста трещин.

Ключевые слова: импульсный гидравлический разрыв пласта; многостадийный гидравлический разрыв пласта; Баженовская свита; Доманиковые отложения; низкопроницаемый коллектор; циклическое нагружение; трещинообразование.

be viewed as a universal substitute for multistage hydraulic fracturing but rather as a component of a hybrid design. Pulsed fluid injection shows promise for applications involving preliminary cyclic loading, short-term flow rate modulation at the start of the operation, and mini-fracturing treatments. Requirements are outlined regarding geomechanical justification, the selection of pulse frequency and amplitude, and the monitoring of fracture propagation.

Keywords: pulse hydraulic fracturing; multistage hydraulic fracturing; Bazhenov Formation; Domanik deposits; low-permeability reservoir; cyclic loading; fracture formation.

Введение

Разработка низкопроницаемых нефтематеринских толщ требует создания протяженной и высокопроводимой системы фильтрационных каналов между матрицей пласта и горизонтальным стволом скважины. В традиционном многостадийном ГРП основным управляющим параметром служит постоянный или ступенчато изменяемый расход жидкости. Однако такой режим не всегда обеспечивает равномерное раскрытие всех трещин. Значительная доля жидкости может поступать в доминирующие трещины, тогда как инициирование и дальнейшее распространение трещин из других перфорационных интервалов ограничиваются вследствие межтрещинной интерференции и экранирования напряжений [1].

Импульсный ГРП отличается от монотонной закачки периодической модуляцией расхода и давления рабочей жидкости, реализуемой посредством циклического изменения подачи насосных агрегатов или применения гидродинамических пульсаторов в нагнетательном тракте [2]. Механизм воздействия включает кратковременное превышение локального порога разрушения, циклическое раскрытие и смыкание трещин, развитие усталостных микроповреждений, изменение эффективных напряжений и вовлечение естественных трещин в единую фильтрационную систему (рис. 1).

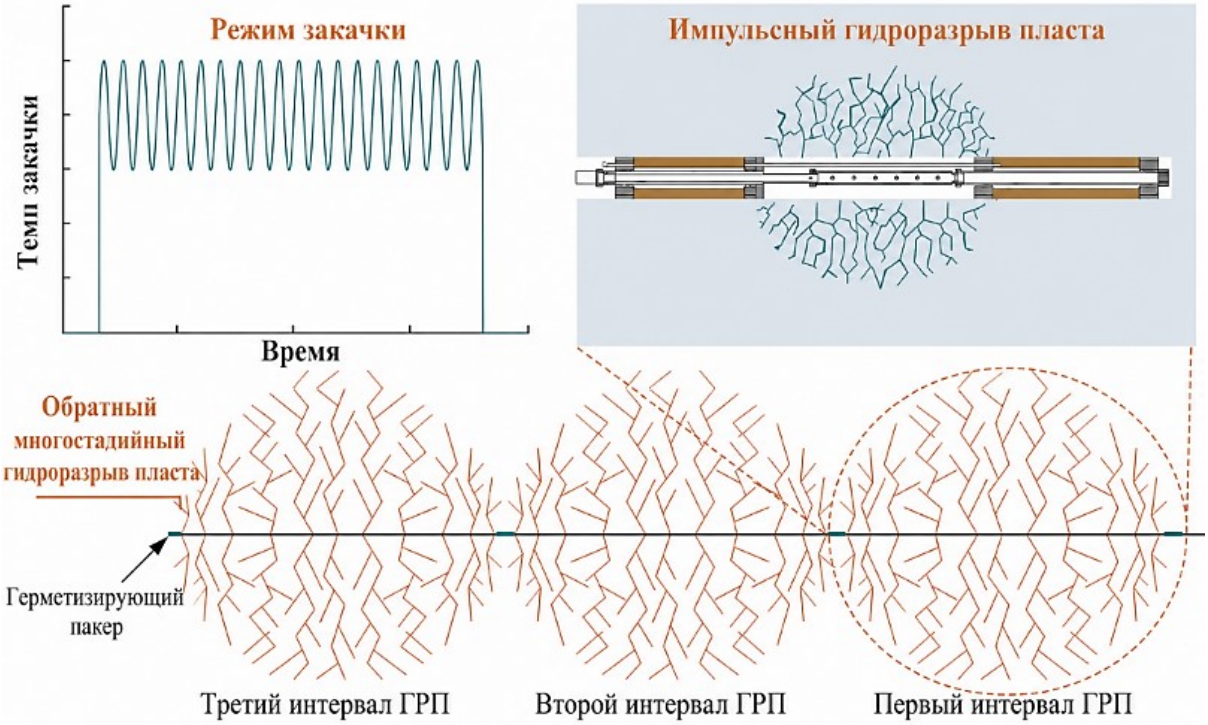


Рисунок 1 – Принцип многоступенчатого импульсного гидравлического разрыва пласта в протяженной горизонтальной скважине

В работе R. Safari и соавторов, посвященной импульсному ГРП сланцевых пород, показано, что циклическое нагружение способно изменить характер разрушения породы в области перехода от пластичного к хрупкому поведению. Авторы связывают перспективность технологии с формированием более разветвленной сети трещин при снижении требуемого давления инициирования по сравнению с непрерывной закачкой [3].

Однако эффективность операции определяется сочетанием предварительной комплексной оценки геомеханики и напряженного состояния пород, естественной трещиноватости, свойств жидкости разрыва и режима освоения скважины.

Современные исследования преимущественно подтверждают данные положения [1, 3–5]:

Циклическая нагрузка вызывает накопление повреждений и уменьшает остаточную прочность пород.

Эффект зависит от амплитуды, частоты и длительности импульса, а также от изначального напряженного состояния пород.

Лабораторный результат нельзя без масштабирования переносить на протяженные трещины МГРП в горизонтальной скважине.

Последнее обстоятельство особенно существенно для Российских сланцевых формаций, отличающихся высокой литологической неоднородностью и контрастными геомеханическими свойствами.

Методы и объекты исследования

Объектами технологической оценки выбраны Баженовская свита Западной Сибири, Доманиковые отложения Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. Общими для этих объектов являются низкая проницаемость матрицы, существенная роль органического вещества, слоистость, минералогическая неоднородность и необходимость применения горизонтальных скважин с многостадийным ГРП. Однако формации различаются по глубине, пластовому давлению, термобарическим условиям, хрупкости, содержанию карбонатов и характеру природной трещиноватости, что исключает возможность применения единого дизайна технологии.

Для оценки применимости импульсного режима ГРП были приняты следующие критерии оценки: снижение давления разрушения, степень вовлечения незадействованных интервалов, изменение геометрии и связности трещин, риск неконтролируемого роста трещины по естественным проводящим зонам, возможность подачи и удержания пропанта, прирост дебита и накопленной добычи относительно контрольных скважин, удельные затраты на жидкость ГРП, а также энергетические затраты.

Результаты и обсуждение

При моделировании многостадийного ГРП в горизонтальной скважине сланцевого коллектора с применением расширенного метода конечных элементов сопоставлялись постоянная закачка и импульсная закачка при одинаковом суммарном объеме жидкости 200 м³ (J. Xiao и др.). Авторы установили, что пульсирующее нагружение способствует дополнительному росту части трещин, прежде всего связанных с породами, менее подверженными межтрещинной интерференции [1]. Доминирующие трещины усиливались, тогда как трещины в крайних или экранированных продуктивных толщах не распространялись. Таким образом, импульсный режим сам по себе еще не обеспечивает равномерного перераспределения закачиваемой жидкости. Увеличение расхода при частоте 1 Гц с 2 до 3 м³/мин повышало амплитуду давления в модели с 24 до 35 МПа и интенсифицировало развитие лишь доминирующих трещин. Следовательно, технологическая задача заключается не в достижении максимальной амплитуды импульса, а в подборе такого сочетания расхода и частоты, при котором энергия расходуется на активацию незадействованных продуктивных толщ, а не на ускоренный рост уже сформированных магистральных трещин.

В работе, посвященной исследованию низкочастотного импульсного воздействия на керне плотных нефтяных пород бассейна Ордос, было получено снижение прочности при сжатии на 15 %, прочности при растяжении на 12 % и давления разрушения примерно на 18 % [4]. Эксперименты выполнялись при частоте 0–50 Гц и амплитуде импульса 1–5 Мпа, причем предпочтительный диапазон частот для разрабо-

танного скважинного генератора был определен в диапазоне 18–20 Гц. Полевые испытания на двух нефтяных скважинах плотного низкопроницаемого коллектора результировали в заметном снижении среднего давления разрушения и росте среднесуточной добычи, относительно других скважин.

Отдельного внимания заслуживают результаты Yu Xu и соавторов, полученные на угольном пласте в шахтных условиях [5]. В лабораторном опыте при предварительном пульсирующем воздействии частотой 8 Гц в течение 2 ч давление разрушения угольных образцов уменьшалось с приблизительно 28 до 19 МПа при увеличении пикового импульсного давления до 9 МПа, то есть на 41,4 %. Расчетная проницаемость возрастала примерно с 1,1–1,2 до 2,2 мДа. В полевом испытании на шахте Changping применяли 15 м³ воды при расходе 120 л/мин, частоте 5–25 Гц и пиковом давление 16 МПа. Газовый поток в обработанных скважинах составлял около 0,17 м³/мин в сравнении 0,07 м³/мин в объектах, не подвергнувшихся обработке.

Данные исследования внесли большой вклад в обоснование механизма усталостного разрушения, но их нельзя непосредственно экстраполировать на сланцевые месторождения. Угольные залежи характеризуется иными упругими параметрами, трещиноватостью, сорбционными процессами и условиями фильтрации.

Для разработки объектов Баженовской свиты промышленно подтверждена эффективность прежде всего горизонтального бурения и многостадийного ГРП. На Пальяновской площади были реализованы многостадийные операции, в опубликованных отраслевых источниках указывается 18-стадийный ГРП с расходом до 14 м³/мин и объем жидкости до 2000 м³ на стадию. Отмечаются промышленные притоки и дополнительная добыча на всех скважинах, подвергнувшихся МГРП.

Импульсное воздействие целесообразно рассматривать в трех вариантах:

1. Как предварительное циклическое нагружение перед закачкой пропанта;
2. Как режим кратковременной модуляции расхода в начале стадии для снижения давления инициирования трещин;
3. В качестве предварительной диагностики для определения реакции пород на давление, расход жидкости и микросейсмический отклик.

Наиболее рискованным является применение высокоамплитудных импульсов с неконтролируемым ростом трещин, поскольку при развитой природной трещиноватости возможно вскрытие водонасыщенных интервалов или формирование низкопроводящих каналов [6, 7].

Для Доманиковых отложений импульсный ГРП потенциально интересен вследствие карбонатно-глинистой неоднородности и наличия естественных трещин. Однако применение должно базироваться на комплексной геомеханической модели, включающей анизотропию напряжений, распределение хрупких карбонатных прослоев, пластовое давление, а также оценку рисков прорыва воды по высокопроводящим естественным трещинам. Ввиду высокой сложности геологического строения является не просто необходимым, а обязательным проведение мини-ГРП, трассерных исследований, контроль давления и сопоставление технологических параметров с контрольными скважинами.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что импульсный гидравлический разрыв пласта обладает обоснованным потенциалом повышения эффективности разработки низкопроницаемых нетрадиционных коллекторов за счет циклического изменения давления, накопления усталостных повреждений породы, снижения давления инициирования трещин и вовлечения естественной трещиноватости в общую фильтрационную систему. Вместе с тем имеющиеся результаты лабораторных, численных и промысловых исследований ограничены и не позволяют считать импульсный режим универсальной заменой традиционному многостадийному ГРП.

Для Баженовской свиты и Доманиковых отложений наиболее обоснованным является его применение в составе гибридной технологии МГРП, предусматривающей предварительное импульсное воздействие и управляемую модуляцию закачки. Однако перед применением данного метода интенсификации необходимо проведение комплексных геомеханических исследований напряженного состояния пород, оценки есте-

ственной трещиноватости, пластового давления, а также комплекс геолого-геофизических мероприятий для предотвращения вскрытия нежелательных водонасыщенных интервалов.

Литература / References:

1. Initiation and propagation of multiple fractures in the horizontal well of shale reservoirs under pulse injection hydraulic fracturing / J. Xiao [et al.] // Energy Exploration & Exploitation. – 2023. – Vol. 41. – № 2. – P. 326–343. – URL : https://doi.org/10.1177/01445987221141117
2. Ren Z., Wang S., Dong K. et al. Exploring the mechanism of pulse hydraulic fracturing in tight reservoirs // Processes. 2023. Vol. 11. № 12. Art. 3398. URL : https://doi.org/10.3390/pr11123398
3. Pulse fracturing in shale reservoirs: geomechanical aspects, ductile/brittle transition, and field implications / R. Safari [et al.] // SPE Journal. – 2015. – Vol. 20. – № 6. – P. 1287–1304. – URL : https://doi.org/10.2118/168759-PA
4. Study and application of pulse hydraulic fracturing for tight oil reservoir / H. Xu [et al.] // International Petroleum Technology Conference, Virtual, 23 March – 1 April 2021. Paper IPTC-21306-MS. – URL : https://doi.org/10.2523/IPTC-21306-MS
5. Prediction of the effects of pulsating hydraulic fracturing on the porous structure and permeability of coal based on NMR and AE spectra / Y. Xu [et al.] // ACS Omega. – 2024. – Vol. 9. – № 19. – P. 21440–21449. – URL : https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01799
6. Modelling rock fracture induced by hydraulic pulses / X. Xi [et al.] // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2021. – Vol. 54. – № 8. – P. 3977–3994. – URL : https://doi.org/10.1007/s00603-021-02477-0
7. Experimental study on fracture propagation and induced earthquake reduction by pulse hydraulic fracturing in shale reservoirs / P. He [et al.] // Gas Science and Engineering. 2023. Vol. 110. Article 204908. URL : https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2023.204908