

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2022, №1, Том 14 / 2022, No 1, Vol 14 <https://esj.today/issue-1-2022.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/23NZVN122.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Нуриев, А. А. Результаты применения полученных коэффициентов вдавливания расклинивающего материала при составлении дизайна гидравлического разрыва пласта для нефтематеринских пород / Нуриев А. А., Кашапов Д. В., Султанов Ш. Х. // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/23NZVN122.pdf>

For citation:

Nuriev A.A., Khashapov D.V., Sultanov Sh.Kh. The results of the application of the obtained coefficients of indentation of the wedging material in the design of hydraulic fracturing for source rock. *The Eurasian Scientific Journal*, 14(1): 23NZVN122. Available at: <https://esj.today/PDF/23NZVN122.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 550.8.055

Нуриев Арсен Альбертович

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия
Аспирант

E-mail: Arn.nuriev@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6744-9289>

Кашапов Денис Вагизович

ООО «Фрак Градиент», Уфа, Россия
Главный менеджер по ГРП

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия
Доцент кафедры «Цифровые технологии в разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений»

E-mail: deniskashapov14@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6467-0191>

Султанов Шамиль Ханифович

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия
Профессор

Доктор технических наук

E-mail: ssultanov@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=445395

Результаты применения полученных коэффициентов вдавливания расклинивающего материала при составлении дизайна гидравлического разрыва пласта для нефтематеринских пород

Аннотация. С увеличением темпов потребления энергии в мире растёт спрос на традиционные энергоносители — углеводороды. Запасы месторождений «лёгкой» нефти истощаются, поэтому вопрос о введении в разработку залежей трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) нефти становится актуальнее с каждым отчётным периодом. В условиях добычи ТРИЗ геолого-технические мероприятия (ГТМ) являются не способом интенсификации притока, а стандартным методом для заканчивания скважины. Наиболее важным является гидравлический разрыв пласта (ГРП), это обуславливается геологическими особенностями пород: повышенная температура, давление, плотность, практически полное отсутствие системы пор.

Чтобы повысить эффективность гидравлического разрыва пласта в первую очередь необходимо уточнить различные факторы дизайна с учётом геологических особенностей

объекта. В рамках данной работы среди множества параметров был выбран для лабораторного определения коэффициент вдавливания расклинивающего материала — пропанта.

В качестве экспериментальных образцов был подобран керновый материал трёх опорных скважин доманиковой свиты. По своему составу образцы преимущественно состоят из известняков с примесью глины и большим содержанием органического вещества, что подтверждается на свежих сколах породы.

В результате лабораторных исследований были получены зависимости между составом породы и вдавливанием пропанта: наибольшее значение наблюдается в участках глин, затем в органическом веществе и минимально для чистых известняков.

Основываясь на полученных значениях, были построены графики зависимости вдавливания расклинивающего материала от его массы. По графику возможно определить коэффициент вдавливания для интересующей массы пропанта и использовать его в дальнейшем дизайне гидравлического разрыва пласта.

Полученные результаты в рамках данной работы позволяют более точно понимать закрепленную геометрию трещины ГРП и производить оценку геометрии трещины (на этапе дизайна) с учетом вдавливания, что позволяет проводить оптимизацию дизайна ГРП для доманиковых отложений, а именно, подбирать такие параметры закачки (расходы жидкости разрыва, концентрацию и массу пропанта, объем буферной стадии), которые увеличат продолжительность жизни трещины ГРП, а следовательно, и накопленный дебит.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта; трудноизвлекаемые запасы; вдавливание пропанта; пропант; нефтематеринские породы; доманиковая свита; керн

На сегодняшний день потребление энергии в мире растёт стремительными темпами и к 2030 году (по данным Международного энергетического агентства) вырастет в 1,5 раза. Тем не менее 80 % рынка будет приходиться на традиционные энергоносители — углеводороды. В связи с этим вопрос о стабилизации и интенсификации добычи нефти стоит на повестке дня всех крупных нефтегазодобывающих предприятий.

На территории Российской Федерации остаётся все меньше месторождений «легкодоступной» нефти, и большинство крупных разрабатываемых ранее объектов переходят на завершающую стадию разработки. Рентабельность добычи базовых запасов также снижается из-за того, что большинство новых месторождений — мелкие или средние по своим размерам, и целесообразность их обустройства занижается. Недропользователи вынуждены переходить к работе с более требовательными объектами, такими как Сахалин или Арктика.

Чтобы продолжать эффективную разработку месторождений и вовлекать в добычу новые объекты, недропользователи вынуждены прибегать к технологиям интенсификации добычи углеводородов [1].

В условиях трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) углеводородов (УВ) наиболее эффективным методом интенсификации является гидравлический разрыв пласта (ГРП) [2].

Эволюция применения ГРП условно разделяется на несколько этапов:

1 этап — начало разработки. Технология ГРП применяется в качестве средства, восстанавливающего естественную продуктивность скважины. Метод необходим ввиду того, что в процессе бурения происходит загрязнение призабойной зоны пласта.

2 этап — повышение уровня добычи. В технологии ГРП начинают увеличивать объёмы закачиваемого расклинивающего агента (проппанта), что позволяет помимо восстановления продуктивности, также вовлекать в разработку средне- и низко продуктивные коллектора.

3 этап — интенсификация. Для операции ГРП используются более крупные фракции проппанта и повышается его концентрация, для создания трещин высокой проводимости, позволяющей проводить добычу в низкопродуктивных частях объекта и вовлекать в разработку участки с низкими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС).

4–6 этапы заключаются в совершенствовании технологии ГРП для вовлечения в разработку ТРИЗ [3; 4].

Стоит отметить, что необходимость применения ГРП растёт по мере перехода от классических объектов к ТРИЗ.

На территории Российской Федерации доля ТРИЗ УВ составляет по разным оценкам 60 % и содержится также в нефтематеринских породах (НМП) баженовской и доманиковой свит (ДС). Для вовлечения залежей в разработку проводился ряд опытно-промышленных испытаний (ОПИ), в т. ч. ГРП. Важно отметить, объекты разработки залежей ТРИЗ характеризуются низкими значениями ФЕС, насыщенности подвижной углеводородной фазы [5].

Процесс разработки осложняется такими факторами, как повышенная пластовая температура, присутствие зон аномально высокого пластового давления. Однако ключевым отличием ТРИЗ от традиционных залежей углеводородов является их состав — в них содержится большое количество твёрдой неподвижной фазы органического вещества.

Обращаясь к статистике, стоит отметить, что на текущий момент успешность операции ГРП на нефтематеринских породах находится в зоне неопределённости, потому что геологические характеристики и особенности пород слабо изучены.

Зачастую, не учитываются или учитываются в меньшей мере некоторые параметры и характеристики в симуляторах дизайна ГРП или внесенные в расчёт константы не актуальны для нефтематеринских пород.

Дизайн ГРП требует уточнения ряда факторов, в рамках данной работы проведён анализ значений коэффициента вдавливания и разрушения проппанта, выведенные зависимости учтены и замоделированы в симуляторе ГРП.

В рамках лабораторных экспериментов объектом исследования были выбраны нефтематеринские породы доманиковой свиты. На территории Республики Башкортостан (РБ) коллектор ДС преимущественно выражен органогенными и зернистыми известняками, реже встречаются другие карбонатные породы. Порово-трещинные и каверно-порово-трещинные являются преобладающими типами коллекторов [6].

На ДС РБ были проведены испытания на приток: из 65 скважин в 11 была получена нефть, в остальных 54 скважинах был получен фильтрат глинистого раствора, вода, либо приток отсутствовал. Положительный эффект по 11 скважинам был получен в связи с улучшением коллекторских свойств, увеличением карбонатности разреза, повышением доли трещинных коллекторов [7].

В 2020–2021 гг. был проведен ГРП ДС на территории РБ по двум опорным скважинам. Они характеризовались схожими геологическими условиями и во время проведения операции были получены схожие осложнения — был зафиксирован не прекращающийся рост давления при вхождении проппанта в пласт, что не позволило до конца провести мероприятия. По первой скважине был получен дебит нефти 20.97 т/сут., в то время как по второй — 1.68 т/сут.

Причиной сниженного дебита второй скважины была установлена слабая геологическая изученность пород. Исходя из ОПИ видно, что применение ГРП на доманиковой свите имеет перспективы для добычи, но требует дальнейшего совершенствования операции как с уточнением геологической модели, так и со стороны программного моделирования.

В дизайне ГРП учитывается коэффициент вдавливания расклинивающего материала. Большинство специалистов не вносит значения вдавливания проппанта в породу, т. к. отсутствуют лабораторные исследования. Однако вдавливание и разрушение проппанта играет особую роль для НМП ввиду их геологических особенностей: повышенная плотность, практически полное отсутствие пористости, высокие пластовые давления, высокие значения модуля Юнга [8; 9].

Для лабораторного определения коэффициента вдавливания проппанта были выбраны 3 опорные скважины с различными интервалами отбора кернового материала интервала ДС, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Интервалы отбора кернового материала (А.А. Нуриев, 2022 г.)

Скважина	1 интервал отбора, м	2 интервал отбора, м
№ А	1575,1	1578
№ Б	1891	1892
№ В	2007,3	2008,4

Керновый материал скважины № А представлен известняками с высоким содержанием органического вещества (ОВ). На более тёмных участках содержание ОВ выше, чем на светлых. Ярко выражен запах ОВ на свежем сколе. Известняки от темно-серого до черного цвета, микрокристаллические, биокластовые со структурой мадстоун, вакстоун, участками возможно перекристаллизованные. Кремнисто-карбонатные и карбонатно-кремнистые породы черные и темно-серые, с высоким содержанием ОВ. Породы плотные, крепкие, слоистые. Переслаивание литологических разностей, подчеркнуто горизонтальной ориентировкой биокластов. Биокласты: тентакулиты, стилиолины. Вероятно нахождение примазок и тонких прослоев битума.

Керновый материал скважины № Б представлен известняками с примесью глинистого темно-коричневого материала, буровато-серые мелкоорганогенные, микро-тонкозернистые, участками интракластовые, неясно-слоистые, плотные, крепкие. Текстура пород обусловлена сгущением сутур, стилолитов. Обломки (интракласты) различной формы размером от 1–3 мм до 3–6 см. Биокласты: членики криноидей, раковинный детрит (в т. ч. створки брахиопод). Встречаются редкие субгоризонтальные сомкнутые трещины, иногда разветвляющиеся.

Керновый материал скважины № В представлен тёмно-серыми известняками, с запахом углеводородов на свежем сколе, с содержанием ОВ, биокластовые со структурой вакстоун с микрокристаллическим цементом, неясно-слоистые, плотные, крепкие. Текстура неясно горизонтально-слоистая за счет ориентировки органических остатков и прослоев серых известняков. Биокласты: раковинный детрит, тентакулит [10].

Лабораторные исследования на вдавливания проппанта производились на гидравлическом испытательном прессе «ИП-100», предназначенном для статических испытаний на сжатие. Погрешность измерений составляет 2 %.

Для проведения лабораторных исследований образец кернового материала помещался в специальную твёрдосплавную обойму с внутренним диаметром 30 мм, что соответствует диаметру керна. Давление на образец оказывалось посредством внешнего поршня, который под действием прессы входил в обойму.

При исследованиях использовались пропанты двух фракций: 20/40 и 30/50.

Выбор этих размеров обусловлен тем, что они зарекомендовали себя при применении ГРП на ДС, так как имеют малый диаметр зерен пропанта, а для пластов ДС, характеризующихся повышенными значениями модуля Юнга, инициируется и разевается трещина ГРП малой ширины.

По результатам исследований были выявлены зависимости:

1. На затемнённых участках (известняки с примесью глины) вдавливание пропанта больше на 0.03–0.05 мм, чем на светлых (чистые известняки). Это связано с меньшей плотностью пород.
2. Углубление пропанта в породу происходит не равномерно, что подтверждает изменчивую плотность пород, которая определяется неясно-слоистой текстурой.
3. На свежих сколах кернового материала подтверждается особенность доманикитов — повышенное содержание ОВ.
4. На участках породы с чистыми известняками, пропант создаёт поры минимальных размеров.
5. На тёмных участках, где сконцентрировано большое количество органического вещества, вдавливание происходит сильнее на 0.05–0.07 мм (в сравнении с чистыми известняками).

Для дальнейшей работы полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Обобщённая таблица с результатами лабораторных исследований (А.А. Нуриев, 2022 г.)

Пропант	Масса пропанта, кг	Концентрация пропанта кг/м ²	Глубина вдавливания пропанта, мм	Пропант	Масса пропанта, кг	Концентрация пропанта кг/м ²	Глубина вдавливания пропанта, мм
20/40	0,7	1	0,4	30/50	0,7	1	0,5
	1,5	2	0,4		1,5	2	0,4
	2,1	3	0,2		2,1	3	0,1
	2,8	4	0,2		2,8	4	0,1
	3,5	5	0,2		3,5	5	0,1

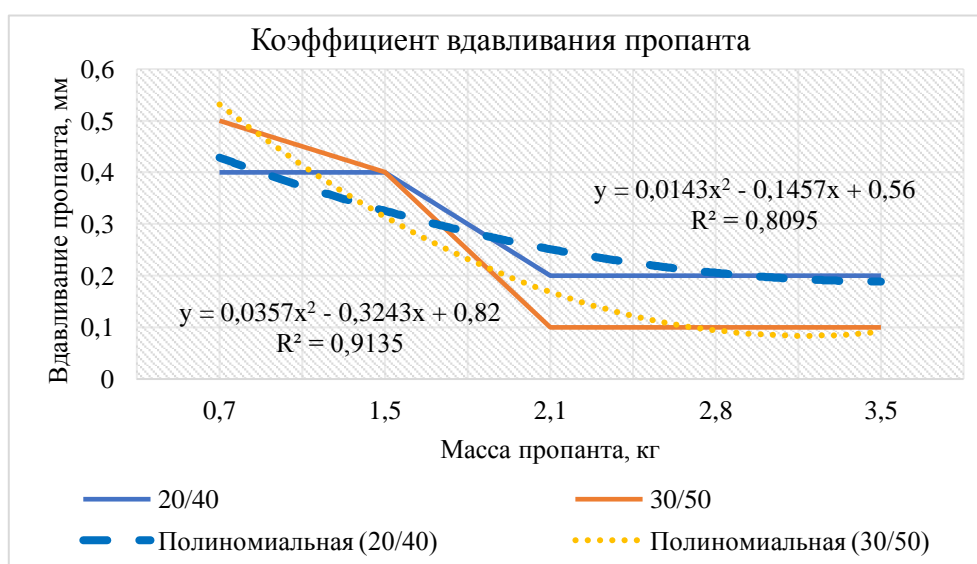


Рисунок 1. График зависимости массы от вдавливания пропанта (А.А. Нуриев, 2022 г.)

5. Валеев А.С. Повышение эффективности выработки остаточных запасов нефти из низкопродуктивных коллекторов с использованием газового и водогазового воздействия / Валеев А.С., Котенёв Ю.А., Котенёв А.Ю., Мухаметшин В.Ш., Султанов Ш.Х. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, — 2019. — № 7(331). — С. 59–64.
6. Хусаинов Р.Ф. Разработка залежей «низкопроницаемых Доманиковых коллекторов с применением массивованного гидроразрыва пластов на примере НГДУ «Альметьевнефть» / Хусаинов Р.Ф., Н.А. Назимов, Н.Ф. Гумаров, Б.Г. Ганиев, М.В. Швыденко, Р.Ш. Абсалямов. // Георесурсы, — 2015. — № 4(63), Т. 2. — С. 14–17.
7. Султанов Ш.Х. Комплексный подход к разработке крупных нефтяных месторождений с трудноизвлекаемыми запасами / Андреев В.Е. // Нефтегазопромысловое дело, 2009. — № 3. — С. 13–16.
8. Кудряшов С.И. Гидроразрыв пласта как способ разработки низкопроницаемых коллекторов / Кудряшов С.И., Бачин С.И., Афанасьев И.С., Латынов А.Р., Свешников А.В., Усманов Т.С., Пасынков А.Г., Никитин А.Н. // Нефтяное хозяйство. 2005. — № 2. — С. 80.
9. Кашапов Д.В. Эволюция развития технологий многостадийного гидроразрыва пласта на сланцевых объектах США / Кашапов Д.В., Федоров А.Э., Сергейчев А.В., Зейгман Ю.В. // Нефтегазовое дело. 2021. — Т. 19. № 5. — С. 53–66.
10. Тахаусов А.А. Изучение литологических особенностей доманиковых отложений Первомайского месторождения / Тахаусов А.А., Титов А.А. // Георесурсы. 2018. — Т. 20. № 4. — С. 324–330.

Nuriev Arsen Albertovich

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
E-mail: Arn.nuriev@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6744-9289>

Kashapov Denis Vagizovich

LLC «Frac Gradient», Ufa, Russia
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
E-mail: deniskashapov14@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6467-0191>

Sultanov Shamil Khanifovich

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
E-mail: ssultanov@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=445395

The results of the application of the obtained coefficients of indentation of the wedging material in the design of hydraulic fracturing for source rock

Abstract. With the increase in the rate of energy consumption in the world, the demand for traditional energy carriers — hydrocarbons — is growing. The reserves of «light» oil fields are depleted, so the issue of introducing hard-to-recover oil reserves into the development of deposits becomes more relevant with each reporting period. In the conditions of hard-to-recover oil production, workover are not a method of intensification of the inflow, but a standard method for well completion. The most important is hydraulic fracturing, this is due to the geological features of the rocks: elevated temperature, pressure, density, and the almost complete absence of a pore system.

In order to increase the efficiency of hydraulic fracturing, it is first necessary to clarify various design factors, taking into account the geological features of the object. Within the framework of this work, among the many parameters, the indentation coefficient of the proppant was chosen for laboratory determination.

As experimental samples, the core material of three reference wells of the Domanik formation was selected. In terms of their composition, the samples mainly consist of limestones with an admixture of clay and a high content of organic matter, which is confirmed by fresh rock chips.

As a result of laboratory studies, dependencies between rock composition and proppant indentation were obtained: the highest value is observed in clay areas, then in organic matter, and minimally for pure limestones.

Based on the obtained values, plots of dependence of proppant indentation on its mass were plotted. According to the graph, it is possible to determine the indentation coefficient for the proppant mass of interest and use it in the further hydraulic fracturing design.

The results obtained within the framework of this work allow us to more accurately understand the pinned fracture geometry and evaluate the fracture geometry (at the design stage) taking into account indentation, which allows us to optimize the hydraulic fracturing design for Domanik formations, namely, to select such injection parameters (fracture fluid flow rates, concentration and mass of proppant, volume of the buffer stage), which will increase the life span of the hydraulic fracture, and, consequently, the accumulated flow rate.

Keywords: hydraulic fracturing; tight oil and gas; source rock; proppant indentation; proppant; oil-producing rocks; Domanik formation; core