

DOI 10.25689/NP.2019.2.125-137

УДК 622.276.66(470.41)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ ГРП, ПРИМЕНЯЕМОЙ НА
ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРАХ РОМАШКИНСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ, РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ
НГДУ «АЗНАКАЕВСКНЕФТЬ»**

¹Таипова В.А., ²Гуторов Ю.А., ³Рахмаев Л.Г.

¹Институт «ТатНИПИнефть»

²РКНТЦ «Нефтяная долина»

³НГДУ «Азнакаевскнефть» ПАО «Татнефть»

**FACTORS AFFECTING HYDRAULIC FRACTURING EFFICIENCY IN
TERRIGENOUS RESERVOIRS OF ROMASHKINSKOYE OIL FIELD**

¹Taipova V.A., ²Gutorov U.A., ³Rakhmaev L.G.

¹TatNIPIneft Institute

²RKNTC Neftyanaya Dolina

³NGDU Aznakaevskneft PJSC TATNEFT

E-mail: azn09sg@tatneft.ru

Аннотация. В работе приводятся результаты анализа технологической и экономической эффективности ГРП в условиях поздней стадии разработки продуктивных площадей НГДУ «Азнакаевскнефть», эксплуатирующих терригенные коллектора пашийского горизонта. Интерес к данной проблеме был вызван постепенным снижением как технологической, так и экономической эффективности ГРП и исследованием причин этого процесса, а также поиском путей не только его стабилизации, но и возможного повышения.

Были изучены различные факторы, которые могли повлиять на эффективность рассматриваемой технологии, включая как геолого-физические, так и геолого-промысловые условия конкретных продуктивных площадей НГДУ «Азнакаевскнефть». Выполненные исследования позволили установить оптимальные критерии выбора объектов воздействия по их ФЕС, а также оптимизировать режимы ГРП с учетом конкретных геолого-физических и геолого-промысловых условий.

Ключевые слова. ГТМ, ГРП, успешный, неуспешный, порог рентабельности коэффициент корреляции, компенсация, остаточные извлекаемые запасы.

Abstract. The paper presents analysis of technical and economic efficiency of hydraulic fracturing in Pashiyan terrigenous reservoirs located in mature productive areas. This problem excited interest due to gradual decline of hydrofrac technical and economic efficiency. The aim was to investigate the reasons for this decline and to find solutions to the problem.

Various factors have been analyzed that affect the efficiency of hydraulic fracturing, including geological setting and field conditions in productive areas developed by NGDU Aznakaevskneft. Optimum criteria have been identified to select target reservoirs for frac jobs based on their flow properties. Hydrofrac scheme has been optimized with regard to geological setting and field conditions.

Key words: *formation stimulation, successful hydrofrac treatment, unsuccessful hydrofrac treatment, break-even point, correlation factor, remaining recoverable reserves*

НГДУ «Азнакаевскнефть» вот уже на протяжении более чем пятидесяти лет активно разрабатывает несколько нефтеносных площадей Ромашкинского месторождения, которые находятся на его Юго-Восточном склоне.

Сначала эти площади разрабатывались по технологии внеконтурного заводнения, затем, по мере уменьшения текущей добычи, они были переведены на технологию внутриконтурного заводнения в сочетании с площадным заводнением с постепенным её преобразованием в очаговую.

По мере продолжающегося снижения текущей добычи на площадях НГДУ «Азнакаевскнефть» стали активно применяться различные ГТМ с целью повышения продуктивности эксплуатационного фонда. Наибольшее распространение в силу своей промыслово-экономической эффективности получили следующие ГТМ: гидравлический разрыв пласта – 57 %, физические методы воздействия (перфорация, ДП+ТИМ, ГДРП и др.) – 32 %, химические методы воздействия (СКО, ПАВ, МБВ и др.) – 11 %.

В течение более чем пятидесятилетней эксплуатации промыслового фонда скважин НГДУ «Азнакаевскнефть» было установлено, что по мере роста обводненности добываемой продукции выше 70-80 % эффективность перечисленных ГТМ стала быстро снижаться по экспоненциальному

закону, что привело нефтедобывающее предприятие практически к полному отказу от физических и химических ГТМ в пользу ГРП, эффективность применения которого на некоторых площадях также начинает достигать к настоящему времени критического уровня рентабельности (см. табл.1).

Таблица 1

Сводные данные о промыслово-экономической эффективности ГРП на продуктивных площадях НГДУ «Азнакаевскнефть»

№ п/п	Площадь	Успешные ГРП выше порога рентабельности, %	Успешные ГРП ниже порога рентабельности, %	Общая доля успешных ГРП, %	Неуспешные ГРП, %	Всего количество
1	Азнакаевская	7	60	67	33	140
2	Восточно-Ленинградская	42	36	78	22	323
3	Павловская	26	57	83	17	545
4	Карамалинская	19	44	63	37	70
5	Холмовская	5	4	9	91	68
6	Зеленогорская	43	33	76	24	382
	Среднее	24	39	63	37	255

В табл. 1 приведены данные по результатам ГРП с учетом не только технологической, но и экономической рентабельности, в качестве которой принята прирост в добыче нефти, равная 2,7 тонн/сут. При этом оказалось, что в некоторых случаях прирост по нефти после ГРП отсутствовал, что было отнесено по статистике к «неуспешным» результатам по сравнению с «успешными» выше порога рентабельности и «успешными» - ниже порога рентабельности.

Анализ приведенных в табл. 1 данных о соотношении «успешных» и «неуспешных» результатов ГРП по шести площадям Ромашкинского месторождения, разрабатываемых НГДУ «Азнакаевскнефть» показал, что доля «успешных» ГРП выше порога рентабельности изменяется от 5 % по Холмовской площади, до 43 % - по Зеленогорской площади, т.е. в 8 раз, а

доля «успешных» ГРП ниже порога рентабельности изменяется от 4 % - по Холмовской площади, до 60 % - по Азнакаевской площади, т.е. в 15 раз! Подобное соотношение «успешных» ГРП выше и ниже порога рентабельности является убедительным признаком того, что данная технология располагает перспективной возможностью поднять уровень текущей рентабельности выше существующего порога её себестоимости.

Ранее проведенными исследованиями [1], выполненными с целью оптимизации технологии ГРП в условиях НГДУ «Бавлынефть» на девонском и бобриковском продуктивном горизонтах, была подтверждена эффективность влияния фильтрационно-емкостных свойств продуктивного пласта и технологических параметров ГРП на его эффективность и предложена методика их изучения с учетом уровня текущей рентабельности этой технологии.

Результаты применения этой методики исследований на промысловых материалах, полученных в условиях НГДУ «Азнакаевскнефть» при использовании в качестве ГТМ технологии ГРП с 2010 по 2017 гг. приведены на рис. 1, а, б, в, г.

Из графических материалов, приведенных на этих рисунках следует, что зависимость прибавки дебита после ГРП от глинистости и проницаемости имеет экстремальный характер с минимумом в области $K_{гл} = 4,5 \%$ и абсолютной проницаемости $K_{пр} - 550$ мД, а от пористости и начальной нефтенасыщенности – имеет прямо пропорциональный характер. Подобные зависимости характерны практически для всех продуктивных площадей НГДУ «Азнакаевскнефть» и отличаются только значениями предельных границ фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС), которые могут быть использованы в качестве оптимальных критериев выбора объектов (скважин) для проведения ГРП (см. табл.2).

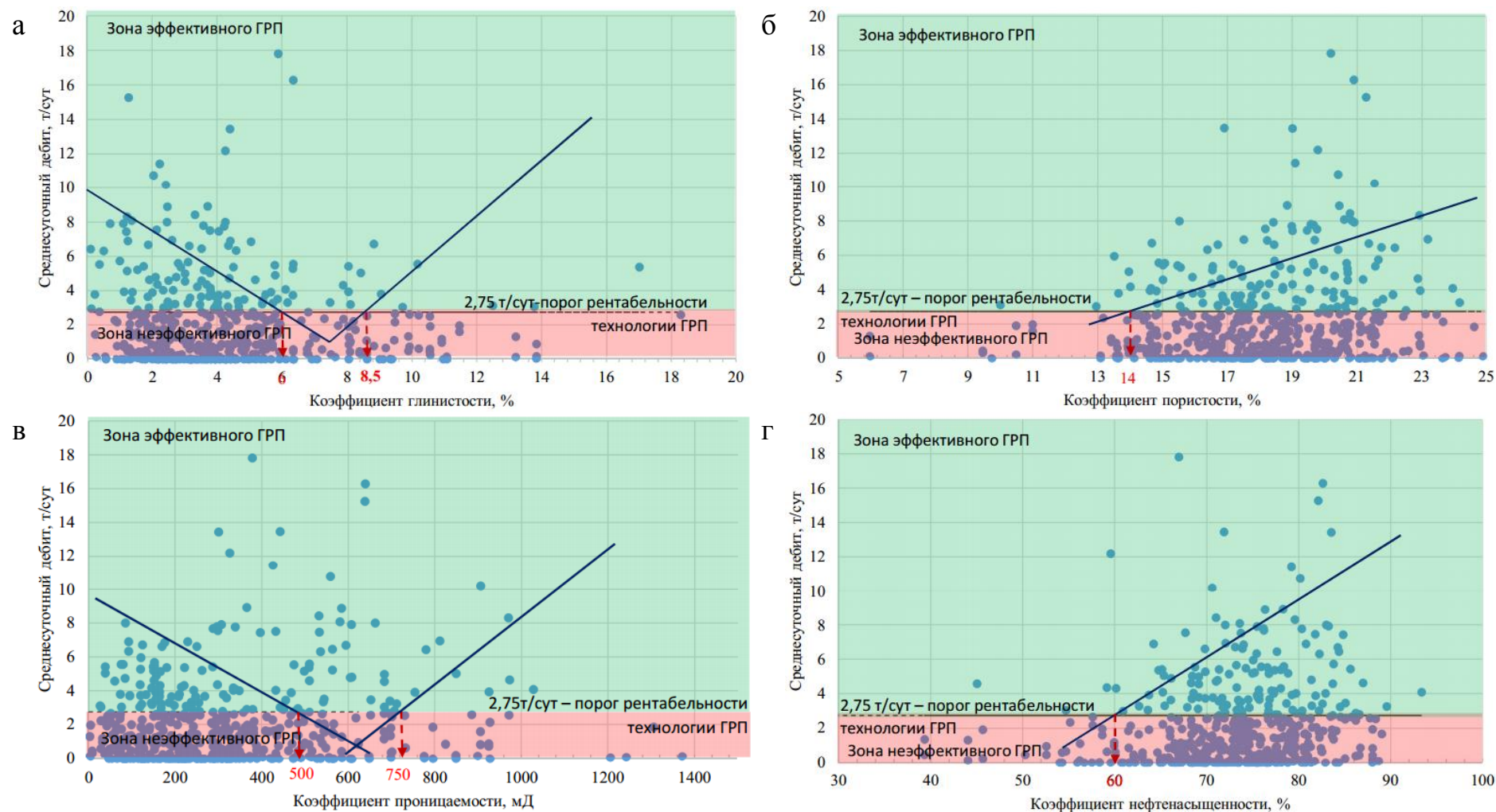


Рис. 1. Корреляционно-статистические зависимости эффективности проведения технологии ГРП от ФЕС (а-коэффициентов глинистости, б-пористости, в - проницаемости и г - нефтенасыщенности) по Восточно-Ленинградской площади

Таблица 2

**Критерии рентабельной применимости технологии ГРП в условиях
НГДУ «Азнакаевскнефть».**

Площадь	Кгл, %	Кпор, %	Кпр, мД	Кн/нас, %
Азнакаевская	<4	>19	>450	>70
Восточно-Ленинградская	<3,5; >4,5	>14	<500; >600	>55
Зеленогорская	<4; >6	>13,5	<450; >550	>50
Карамалинская	>2	>15	<200; >550	>55
Павловская	<4,5; >5,5	>13	<500; >600	>50
Холмовская	-	>17	<400	>65

Поскольку, как показали предыдущие исследования [1], на технологическую и экономическую эффективность ГРП влияют технологические параметры: давление ГРП, объем жидкости разрыва и объем расклинивающего агента – проппанта, то нами также были проведены соответствующие исследования, результаты которых представлены на рис. 2, а, б, в.

Из полученных зависимостей следует, что каждый из этих параметров имеет предельные «критические» значения, при превышении которых начинается быстрое обводнение продукции полученной после применения ГРП. Причем, их значения зависят от конкретных геолого-физических условий и варьируют от одной продуктивной площади к другой (см. табл. 3).

Как видно из данных, приведенных в табл. 3 и на графиках рис. 2, а, б, в, технологические параметры ГРП оказывают существенное влияние на его рентабельность, обусловленную степенью обводненности добываемой после его применения продукции.

Причем, как показывает практика применения технологии ГРП, процесс интенсивного обводнения продуктивных коллекторов, обладающих высокими коллекторскими свойствами, приводит к тому, что основная доля остаточных запасов имеет тенденцию концентрироваться в коллекторах с худшими фильтрационно-емкостными свойствами, что накладывает определенные ограничения на выбор региона ГРП как по давлению, так и объему жидкости разрыва и проппанта.

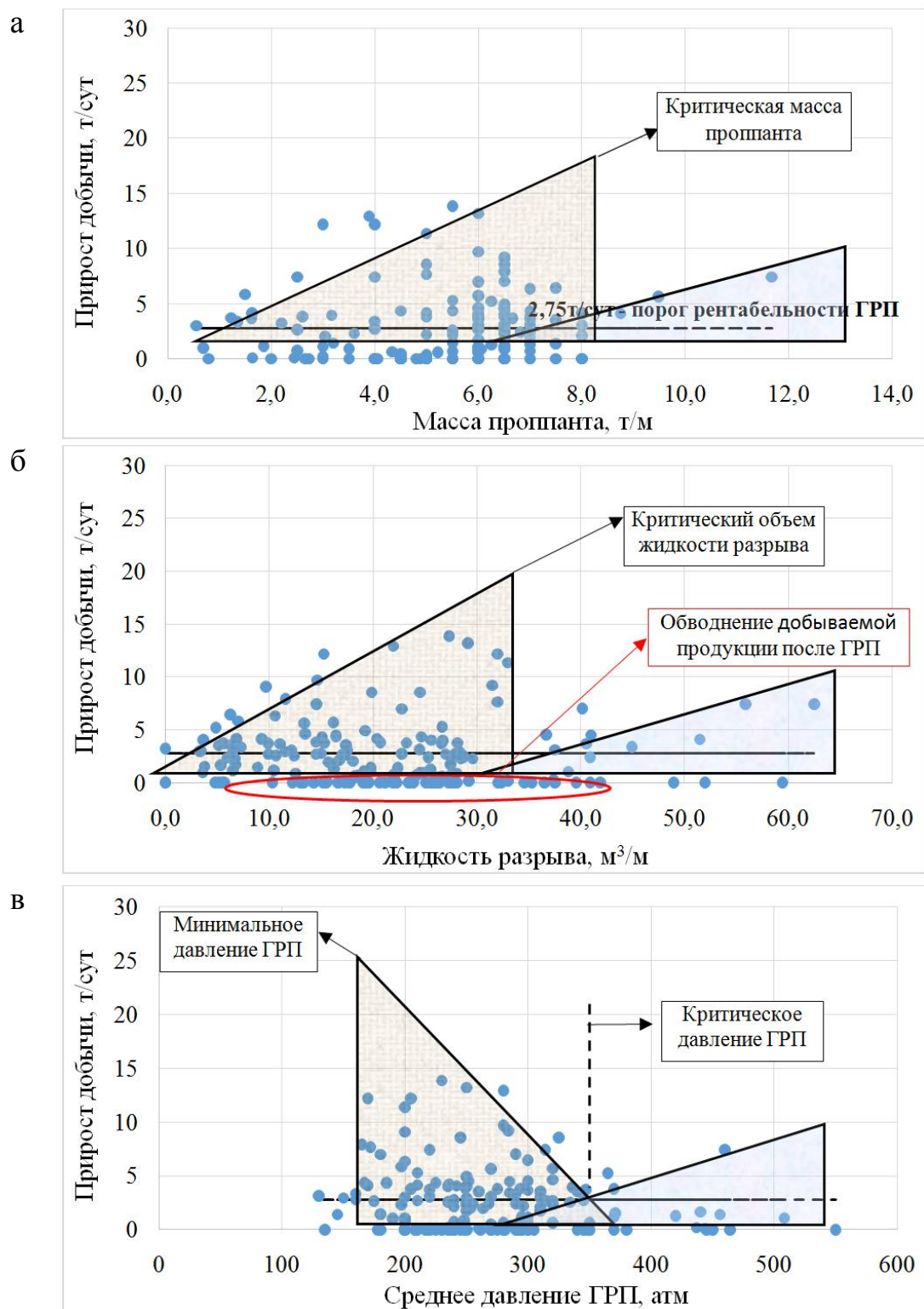


Рис. 2. Корреляционно-статистические зависимости эффективности проведения технологии ГРП от технологических параметров ГРП по Восточно-Лениногорской площади

а-массы пропантa, б-объема жидкости разрыва, в – среднего давления ГРП

 - прирост нефти;  - прирост воды

Таблица 3

Критерий рентабельной технологии ГРП по площадям НГДУ «Азнакаевскнефть»

№ п/п	Площадь	$P_{ГРП}$, МПа	$Q_{жид\ ГРП}$, м ³ /м	$V_{пл}$, т/м
1	Азнакаевская	25	25	6
2	Восточно-Лениногорская	40	35	8
3	Зеленогорская	45	35	8
4	Карамалинская	30	30	7
5	Павловская	45	35	8
6	Холмовская	25	20	5

Известно, что большую роль в технологической рентабельности ГРП играет соотношение между давлением при ГРП и пластовым давлением – $P_{пл}$ [2]. Причем, чем ближе величина $P_{ГРП}$ к пластовому давлению, тем выше эффективность ГРП, разумеется, без учета влияния фактора обводнения продукции, вероятность которого на поздней стадии разработки существенно возрастает.

Чтобы оценить геолого-технические условия, в которых формируются остаточные запасы на поздней стадии разработки продуктивных площадей НГДУ «Азнакаевскнефть», была изучена связь между пластовым давлением и величиной, как остаточных запасов, так и накопленной добычи от применения ГРП.

Результаты исследований приведены на рис. 3, из которых следует, что максимальная доля, как остаточных запасов, так и накопленной добычи за счет применения ГРП формируется в продуктивных пластах с пластовыми давлениями, ниже 160 атм., что необходимо учитывать при выборе режима ГРП.

Выявленная нами тенденция была также подтверждена дополнительными исследованиями зависимости вклада в накопленную добычу скважин с $P_{пл} \leq 120$ атм после ГРП с давлением разрыва, близким к пластовому, в зависимости от того была ли эта технология «успешной» или «неуспешной» (см. рис. 4 а, б).

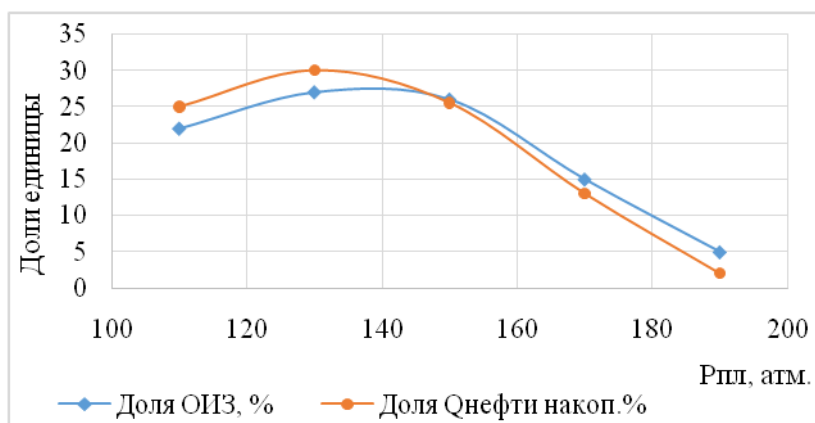


Рис. 3. Зависимость доли остаточных извлекаемых запасов (ОИЗ) и доли накопленной добычи нефти $\Delta Q_n^{нак}$ после ГРП на скважинах НГДУ «Азнакаевскнефть» с разным пластовым давлением на 2017 год.

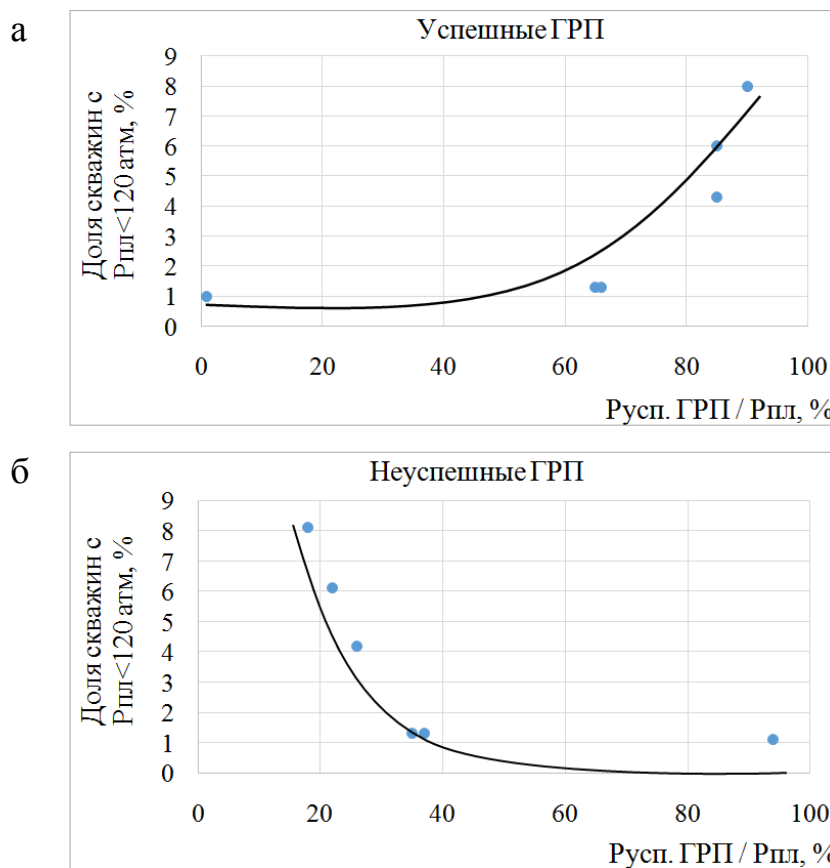


Рис. 4. Зависимость доли скважин с пластовым давлением менее 120 атм. от соотношения давления при ГРП с пластовым давлением в случае «успешных» и «неуспешных» результатов для площадей, разрабатываемых НГДУ «Азнакаевскнефть»

Из зависимостей, приведенных на рис. 4 (а, б) следует, что для «успешных» ГРП с ростом давления ГРП в скважинах с $P_{пл} \leq 120$ атм неуклонно растет, а доля «неуспешных» ГРП, соответственно, снижается.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3 не мог дать ответа на причины формирования остаточных запасов в коллекторах, эксплуатирующих девонские отложения, приуроченных к пластовым давлениям ниже гидростатических. С целью уточнения причин такого явления была проанализирована динамика коэффициента компенсации, равного $Q_{зак}/Q_{отбор}$ в зависимости от пластовых давлений продуктивного горизонта (Рис. 5).

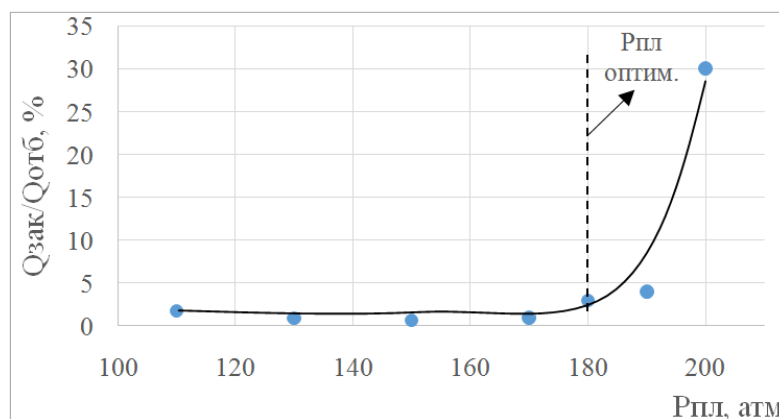


Рис. 5. Зависимость величины коэффициента компенсации от пластового давления на продуктивных площадях НГДУ «Азнакаевскнефть»

Из зависимости, приведенной на рис. 5 следует, что приблизительно треть эксплуатационного фонда имеет пластовое давление, превышающее в 3 и более раз начальные пластовые давления. При этом надо иметь в виду, что это относится к той части девонских продуктивных отложений, которые имели максимальную начальную нефтенасыщенность (≥ 80 %), максимальную абсолютную проницаемость (≥ 250 мД) и минимальную глинистость (≤ 1 %) [3]. Все вышеизложенное не могло не сказаться не только на их ускоренном обводнении, но также привело к постепенному

вытеснению нефти в низкопроницаемые участки терригенных коллекторов, имеющих более низкие давления.

В результате проведенных исследований факторов, влияющих на эффективность ГРП в скважинах на поздней стадии разработки продуктивных площадей НГДУ «Азнакаевскнефть» можно сделать следующие выводы:

1. Эффективность ГТМ, предназначенных для повышения продуктивности эксплуатационного фонда по мере роста обводненности начинают неуклонно снижаться.
2. Анализ эффективности ГРП на поздней стадии разработки продуктивных площадей показал, что по своей экономической эффективности их можно разделить на «успешные» – выше порога рентабельности, «успешные» – ниже порога рентабельности и «неуспешные», у которых прибавка после ГРП отсутствовала.
3. Исследование технико-экономической эффективности ГРП от ФЕС продуктивных пластов на площадях НГДУ «Азнакаевскнефть» показало, что в большинстве случаев её зависимость от $K_{г\text{л}}$ и $K_{\text{прон}}$ имеет экстремальный характер, а от $K_{\text{п}}$ и $K_{\text{н/нас}}$ – прямо пропорциональный.
4. Исследование технико-экономической эффективности ГРП от технологических параметров показало, что по мере их увеличения дополнительная добыча по нефти растет до некоторого предела, после чего она сменяется ростом обводненности добываемой продукции. Причем, предельные (критические) значения технологических параметров ГРП для разных площадей отличаются достаточно значительно (см. табл. 3).
5. Изучение распределения доли остаточных извлекаемых запасов (ОИЗ) и накопленной добычи после ГРП за 2017 год показало, что они в существенной степени зависят от пластового давления. Причем,

наибольшая часть ОИЗ и накопленная добыча соответствуют пластовому давлению продуктивных коллекторов в диапазоне от 110 до 160 атм.

6. Установлено, что на поздней стадии разработки доля «успешных» ГРП по мере роста давления разрыва увеличивается, а для «неуспешных» ГРП, соответственно, уменьшается.
7. Приуроченность остаточных извлекаемых запасов к коллекторам с пониженными пластовыми давлениями можно объяснить аномальными величинами коэффициента компенсации в девонские отложения с высокими значениями ФЕС.

Список литературы

1. Гуторов Ю.А., Шакурова А.Ф. Основы технологии ГРП в нефтяных и газовых скважинах // Уфа, УГНТУ, 2009, 199 с.
2. Баренблатт Г.И. О некоторых задачах теории упругости, возникающих при исследовании механизма гидравлического разрыва пласта // «Прикладная механика», М., 1956г, т.2, №4, с.475-486.
3. Хусаинов В.М. Увеличение извлекаемых запасов на поздней стадии разработки крупного нефтяного месторождения // Автореферат д-ра технических наук, М., 2011, 50 с.

References:

1. U.A. Gutorov, A.F. Shakurova *Osnovy tekhnologii GRP v neftyanyh i gazovyh skvazhinah* (Fundamentals of hydraulic fracturing in oil and gas reservoirs). Ufa, UGNTU Publ., 2009, 199 p. (in Russian)
2. G.I. Barenblatt *O nekotoryh zadachah teorii uprugosti, voznikayushchih pri issledovanii mekhanizma gidravlicheskogo razryva plasta* (On some elasticity theory problems when studying hydraulic fracturing mechanism). *Prikladnaya mekhanika*, Moscow, 1956, Vol. 2, No. 4, pp. 475-486 (in Russian)
3. V.M. Khusainov, *Uvelichenie izvlekaemyh zapasov na pozdnej stadii razrabotki krupnogo nefryanogo mestorozhdeniya* (Recoverable reserves growth in a large mature field). Extended abstract of Dr.Sc. dissertation. Moscow, 2011, 50 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Таипова Венера Асгатовна, кандидат технических наук, зам директора по научной работе в области РНМ и развития ИТ института «ТаиНИПИнефть» ПАО «Татнефть» имени В.Д.Шашина, г.Бугульма, Республика Татарстан, Российская Федерация
E-mail: taipova.v.a@tatneft.ru

Гуторов Юлий Андреевич, доктор технических наук, руководитель департамента анализа и НИР в области ТЭК, региональный координационный научно-технический центр «Нефтяная долина», академик РАЕН, г. Октябрьский, Республика Башкортостан, Российская Федерация
E-mail: gutorov70@mail.ru

Рахмаев Ленар Гамбарович, ведущий специалист группы геологического сопровождения процессов строительства скважин отдела геолого-технологических мероприятий геолого-технологического центра (ГТЦ) НГДУ «Азнакаевскнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина, г. Азнакаево, Республика Татарстан, Российская Федерация
E-mail: azn09sg@tatneft.ru

Authors

Taipova V.A., PhD, Deputy Director for Research in Reservoir Engineering and IT Development, TatNIPIneft Institute-PJSC TATNEFT, Bugulma, Republic of Tatarstan, Russian Federation
E-mail: taipova.v.a@tatneft.ru

Gutorov U.A., Dr.Sc, Head of Research and Analysis in Fuel and Energy Complex, Regional R&D center Neftyanaya Dolina, member of RANS, Oktyabrsky, Republic of Bashkortostan, Russian Federation
E-mail: gutorov70@mail.ru

Rakhmaev L.G., Lead Specialist, Group for Geological Support of Well Construction Operations, Well Intervention Department, Geology and Technology Center NGDU Aznakaevskneft of PJSC TATNEFT, Aznakaevo, Republic of Tatarstan, Russian Federation
E-mail: azn09sg@tatneft.ru

Рахмаев Ленар Гамбарович
452600, Российская Федерация, Республика Татарстан,
г.Азнакаево, ул. Нефтяников, 24
тел. 8 (855-92) 53223
E-mail: azn09sg@tatneft.ru