

УДК 622.276.66

АНАЛИЗ ПРИЧИН ВЫНОСА РАСКЛИНИВАЮЩИХ АГЕНТОВ ИЗ СКВАЖИН, ВСКРЫВАЮЩИХ I–III ПАЧКУ ПЕТРИКОВСКО-ЕЛЕЦКОЙ ЗАЛЕЖИ РЕЧИЦКОГО НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Д. А. ДУБИНА, О. Л. ВОЙТЕХИН, Р. В. СИНЕЦКИЙ

*Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти
РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель*

Аннотация. Гидравлический разрыв пласта (ГРП) остается наиболее распространенным методом интенсификации добычи углеводородов. Однако его эффективность существенно зависит от выноса расклинивающего агента (РА) из трещины в процессе разрядки и эксплуатации, что приводит к снижению проводимости и продуктивности пласта. В рамках настоящей работы проведен анализ причин выноса РА из скважин, вскрывающих I–III пачку петриковско-елецкой залежи Речицкого нефтяного месторождения. Работа направлена на выявление ключевых факторов, влияющих на эффективность закрепления трещин, и формирование основы для разработки прогнозных моделей поведения трещин ГРП в пластовых условиях.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта, расклинивающий агент.

Для цитирования. Дубина, Д. А. Анализ причин выноса расклинивающих агентов из скважин, вскрывающих I–III пачку петриковско-елецкой залежи Речицкого нефтяного месторождения / Д. А. Дубина, О. Л. Войтехин, Р. В. Синецкий // Нефтегазовый инжиниринг. – 2025. – № 2 (3). – С. 29–40.

ANALYSIS OF THE REASONS FOR THE REMOVAL OF PROPPANT AGENTS FROM WELLS OPENING THE I–III PACK OF THE PETRIKOVSKO-YELETSKAYA DEPOSIT OF THE RECHITSKY OIL FIELD

D. A. DUBINA, O. L. VOITEKHIN, R. V. SINETSKY

*The Belarusion Scientific Research and Design Institute of Oil
RUE “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

Annotation. Hydraulic fracturing (fracking) remains the most common method of intensifying hydrocarbon-production. However, its effectiveness significantly depends on the removal of proppant from the crack during discharge and operation, which leads to a decrease in the conductivity and productivity of the formation. In this paper, we analyzed the causes of RA removal from wells opening the I–III pack of the petrikovsko-yeletskaya deposit of the Rechitsky oil field. The work is aimed at identifying key factors affecting the effectiveness of crack fixing and forming the basis for developing predictive models of the behavior of hydraulic fractures in reservoir conditions.

Keywords: hydraulic fracturing, proppant.

For citation. Dubina D. A., Voitekhin O. L., Sinetsky R. V. Analysis of the reasons for the removal of proppant agents from wells opening the I–III pack of the petrikovsko-yeletskaya deposit of the Rechitsky oil field. *Oil and gas engineering*, 2025, no. 2 (3), pp. 29–40 (in Russian).

Введение. Гидравлический разрыв пласта (ГРП) – одна из основных технологий интенсификации добычи углеводородов, эффективность которой во многом зависит от устойчивости созданной трещины в постоперационный период. Целью выполнения ГРП является увеличение продуктивности скважины путем создания трещины и удержание ее раскрытости, что обеспечивается находящимся в ней расклинивающим материалом [1, 2]. Одной из причин снижения раскрытости созданной трещины мо-

жет служить вынос расклинивающего материала, что влечет за собой два критически важных негативных последствия:

- снижение проводимости трещины (вынос расклинивающего агента (РА) приводит к сужению трещины и, как следствие, падению продуктивности коллектора);
- повреждение скважинного оборудования (незакрепленные частицы РА, попадая в поток добываемого флюида, вызывают абразивный износ подземного оборудования, провоцируя технологические осложнения [3]).

На сегодняшний день данная проблема недостаточно изучена ввиду отсутствия универсальной методики, позволяющей корректно описать процесс поведения частиц расклинивающего материала в пластовых условиях.

Цель работы. Исследовать причины выноса РА в постоперационный период из скважин, вскрывающих I–III пачку петриковско-елецкой залежи Речицкого нефтяного месторождения.

Описание работы. Основной задачей исследования стало выявление вероятных причин выноса РА, что имеет принципиальное значение для оптимизации процесса эксплуатации скважин и снижения технологических рисков. С этой целью был проведен выбор ключевых параметров, потенциально влияющих на интенсивность выноса РА:

- среднее количество кластеров, одновременно обработанных при многостадийном гидравлическом разрыве пласта (МГРП); выдвинуто предположение о том, что по сравнению с одно- и двухкластерными стадиями, при одновременной обработке трех и более кластеров возрастает асимметрия трещин ГРП, что приводит к их неравномерному креплению;
- общее количество кластеров, обработанных при МГРП; выдвинуто предположение, что при увеличении общего количества кластеров, возрастает неравномерность распределения потока жидкости и давления между трещинами, что приводит к неоптимальному закреплению РА в отдельных кластерах;
- плотность расположения кластеров; выдвинуто предположение, что более плотное расположение перфорационных кластеров, может способствовать их асимметрии за счет эффекта «stress shadow»;
- удельная масса РА, закачанная в один перфорационный кластер при проведении МГРП; выдвинуто предположение, что с увеличением массы РА, и, как следствие, объема закачиваемой смеси, с одной стороны, происходит пропорциональное увеличение линейных геометрических параметров трещин ГРП, а с другой – повышается эрозионная нагрузка на прискважинную зону трещины, что в совокупности может создать предпосылки к увеличению интенсивности выноса РА из трещины в скважину в послеоперационный период [4];
- удельный объем закачки кислотного состава (КС) на один перфорационный кластер при проведении МГРП; выдвинуто предположение, что при закачке КС происходит не только очистка ИП и призабойной зоны пласта (ПЗП) от механических карбонатных частиц, но и травление заколонного цемента и разуплотнение пород в ПЗП, что создает обширные полости, где может оставаться некоторая масса свободного (незакрепленного) РА;
- удельный объем разрядки скважины в послеоперационный период; выдвинуто предположение, что с увеличением объемов отбора скважинной жидкости при разрядке, особенно при сверхкритических режимах отбора, происходит ускорение процесса выноса РА из трещины в ствол скважины;
- предельная и усредненная концентрация РА в смеси ГРП при проведении МГРП; выдвинуто предположение, что повышение концентрации РА в смеси ГРП способствует увеличению профиля ширины приустьевого участка трещины, что создает пред-

посылки к более интенсивному выносу ПА в скважину потоком отбираемого флюида;

– расположение скважин относительно геологических формаций; выдвинуто предположение о том, что с учетом высокой степени латеральной неоднородности целевой геологической формации, существуют зоны с геомеханическими параметрами горных пород, не позволяющими эффективно закреплять ПА в теле трещины ГРП [5].

На основании параметров, характеризующих механизм выноса ПА, был сформирован репрезентативный массив данных за период 2024–2025 гг. по скважинам I–III пачки петриковско-елецкой залежи Речицкого месторождения (см. таблицу). Массив включает как технологические показатели проведения МГРП, так и геолого-эксплуатационные характеристики скважин.

Поскольку прямое сопоставление абсолютных объемов вынесенного ПА искажает картину интенсивности процесса (скважины с большим числом кластеров автоматически демонстрируют больший суммарный вынос), целесообразно ввести удельные параметры выноса, приведенные к единице длины интервала нормализации и к одному перфорационному кластеру.

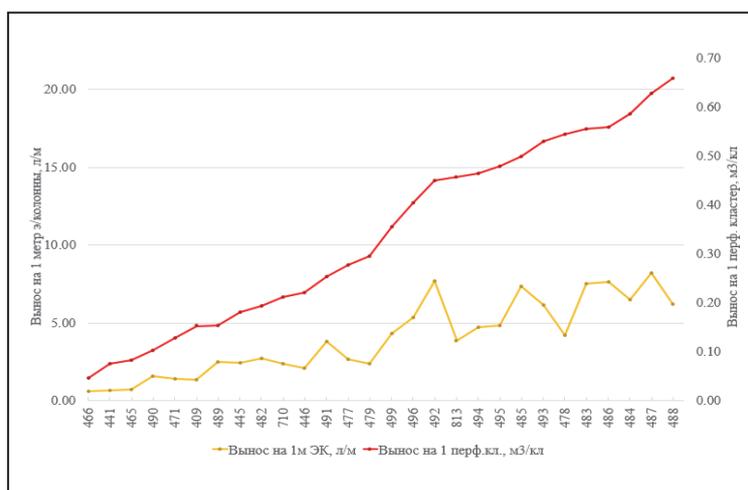


Рис. 1. Корреляция удельного выноса ПА на один перфорационный кластер и на 1 м длины эксплуатационной колонны

Fig. 1. Correlation of the specific removal of PA per perforation cluster and per 1 m of the length of the production casing

На рис. 1 приведены данные корреляции удельного выноса ПА на один перфорационный кластер и на 1 м длины эксплуатационной колонны. Анализ данных показывает удовлетворительную степень сходимости рассматриваемых величин, что позволяет использовать любой из рассмотренных параметров для сравнения интенсивности выноса. В дальнейшем анализе интенсивность выноса будет оцениваться только по удельному объему выноса ПА на один перфорационный кластер.

Для объективной оценки наличия связи между исследуемыми параметрами и удельным объемом выноса ПА был применен анализ линейных трендов с определением угла наклона в процентах от максимального значения переменной:

- 0–15 % – отсутствие значимой связи;
- 15–30 % – слабая или неопределенная связь;
- > 30 % – значимая связь.

Далее представлены результаты анализа по каждому из ключевых параметров с опорой на указанные граничные значения.

Массив данных по выносу РА из скважин I–III и петриковско-слецкой залежи Речицкого месторождения
 Data array on the removal of proppant agents from wells I–III of the petrikovsko-eletsckoy field of the Rechitskoye field

Скважина	Месторождение	Расположение	Отмыто проппанта/песка, м ³	Стадии	Разрядка, м ³	Разрядка, м ³ /кл	Исп. КС, м ³	КС, м ³ /кл	Средняя концен-трация, кг/м ³	Максимальная концен-трация, кг/м ³	Количество классов теров	Количество стадий	Клст	Масса РА на I кл	Плотность классов теров, м/кл	Максимальная клст	Зачано РА, т	Вынос, %	Вынос на кластер, м ³ /кл	
466	Речицкое	вост	2,65	1-29	390	6,84	150	2,63	430	450	58	29	2,0	1399	24,1	75,9	2	1363	0,19%	0,05
465	Речицкое	вост	3,00	2-19	210	5,83	61	1,69	440	450	39	20	2,0	873	22,4	118,8	2	791	0,38%	0,08
441	Речицкое	зап	2,65	1-19	1180	33,71	70	2,00	515	630	39	20	2,0	1045	26,8	112,4	2	1015	0,26%	0,08
471	Речицкое	вост	5,50	1-18	380	8,84	116	2,70	445	450	45	19	2,4	1104	24,5	93,8	3	993	0,55%	0,13
445	Речицкое	зап	9,45	1-26	1410	27,12	64	1,23	575	700	51	26	2,0	1706	33,5	76,8	2	1663	0,57%	0,18
446	Речицкое	зап	8,20	1-19	870	23,51	39	1,05	590	700	39	20	2,0	1045	26,8	106,9	2	1015	0,81%	0,22
409	Речицкое	центр	5,20	1-15	300	8,82	44	1,29	410	450	36	16	2,3	1271	35,3	115,3	3	1561	0,33%	0,15
710	Речицкое	зап	10,00	1-24	1330	28,30	30	0,64	510	700	49	25	2,0	1304	26,6	90,4	2	1274	0,78%	0,21
490	Речицкое	центр	6,60	1-29	1010	15,78	140	2,19	425	450	68	30	2,3	2114	31,1	67,2	3	2049	0,32%	0,10
489	Речицкое	центр	10,30	1-30	670	10,00	73	1,09	435	450	73	32	2,3	2383	32,6	62,6	3	2244	0,46%	0,15
482	Речицкое	центр	11,00	1-27	680	11,93	218	3,82	445	450	58	28	2,1	1791	30,9	72,0	3	1686	0,65%	0,19
491	Речицкое	центр	17,25	1-34	1000	14,71	237	3,49	460	550	71	36	2,0	2440	34,4	67,7	3	2335	0,74%	0,25
483	Речицкое	центр	30,00	1-30	1310	24,26	190	3,52	445	650	55	31	1,8	1905	34,6	75,4	2	1867,5	1,61%	0,56
484	Речицкое	центр	27,00	1-23	600	13,04	171	3,72	510	650	47	24	2,0	1591	33,9	92,5	3	1557	1,73%	0,59
492	Речицкое	центр	35,60	1-38	925	11,71	335	4,24	450	450	79	39	2,0	2353	29,8	59,4	2	2353	1,51%	0,45
485	Речицкое	центр	31,90	1-33	1612	25,19	299	4,67	500	600	64	32	2,0	2238	35,0	68,8	2	2238	1,43%	0,50
477	Речицкое	зап	11,35	1-23	570	13,90	256	6,24	550	700	41	23	1,8	1140	27,8	104,4	2	1140	1,00%	0,28
486	Речицкое	центр	32,40	1-30	1110	19,14	216	3,72	490	600	58	30	1,9	1736	29,9	74,6	2	1736	1,87%	0,56
493	Речицкое	центр	27,00	1-28	716	14,04	207	4,06	550	700	51	28	1,8	1530	30,0	87,2	2	1530	1,76%	0,53
487	Речицкое	центр	36,40	1-30	1110	19,14	171	2,95	550	700	58	30	1,9	1738	30,0	77,9	2	1738	2,09%	0,63
478	Речицкое	зап	18,50	1-18	1525	44,85	155	4,56	505	650	34	18	1,9	926	27,2	130,8	2	926	2,00%	0,54
494	Речицкое	центр	19,50	1-22	350	8,33	162	3,86	550	700	42	21	2,0	1050	25,0	99,7	2	1050	1,86%	0,46
495	Речицкое	центр	21,60	1-23	1195	26,56	148	3,29	545	700	45	23	2,0	1100	24,4	101,0	2	1100	1,96%	0,48
488	Речицкое	центр	27,70	1-22	1000	23,81	157	3,74	540	650	42	22	1,9	1027	24,5	108,2	2	1027	2,70%	0,66
479	Речицкое	зап	11,55	1-20	984	25,23	137	3,51	545	600	39	20	2,0	1100	28,2	125,9	2	1100	1,05%	0,30
813	Речицкое	центр	18,30	1-22	1390	34,75	129	3,23	530	650	40	22	1,8	961	24,0	119,5	2	986	1,86%	0,46
499	Речицкое	центр	18,50	1-27	669	12,87	110	2,12	555	700	52	27	1,9	1300	25,0	83,9	2	1300	1,42%	0,36
496	Речицкое	центр	26,30	1-33	1093	16,82	249,5	3,84	560	600	65	31	2,1	1551	23,9	76,8	2	1551	1,70%	0,40

Анализ вероятной связи интенсивности выноса РА и общего количества кластеров, обработанных при МГРП. На рис. 2 представлена информация об общем количестве кластеров на одну операцию МГРП. Анализ данных показывает, что распределение значений изменяется в диа-пазоне от 34 (скважина 409) до 79 (скважина 492), разброс значений составляет ~ 57 %. При этом явных закономерностей не наблюдается, экстремумы кривой общего количества кластеров распределены хаотически. Общую закономерность характеризует линейный тренд суммарного количества кластеров на операцию, который имеет исчезающе малый наклон ~ 1 %, что указывает на отсутствие влияния общего количества обрабатываемых кластеров на интенсивность выноса РА.



Рис. 2. Корреляция удельного выноса РА на один перфорационный кластер и общего количества кластеров в скважине

Fig. 2. Correlation of specific yield of proppants per perforation cluster and the total number of clusters in the well

Анализ вероятной связи интенсивности выноса РА и средней плотности расположения перфорационных кластеров (межкластерное расстояние). На рис. 3 представлена информация о распределении среднего межкластерного расстояния. Анализ показывает, что распределение значений изменяется в диапазоне от 18,8 м (скважина 409) до 43,8 м (скважина 478), разброс значений составляет ~ 57 %. При этом явных закономерностей не наблюдается, экстремумы кривой средних межкластерных расстояний распределены хаотически. Общую закономерность характеризует линейный тренд средних межкластерных расстояний, который имеет наклон ~ 22 %, что указывает на присутствие минимального влияние среднего межкластерного расстояния на интенсивность выноса РА.

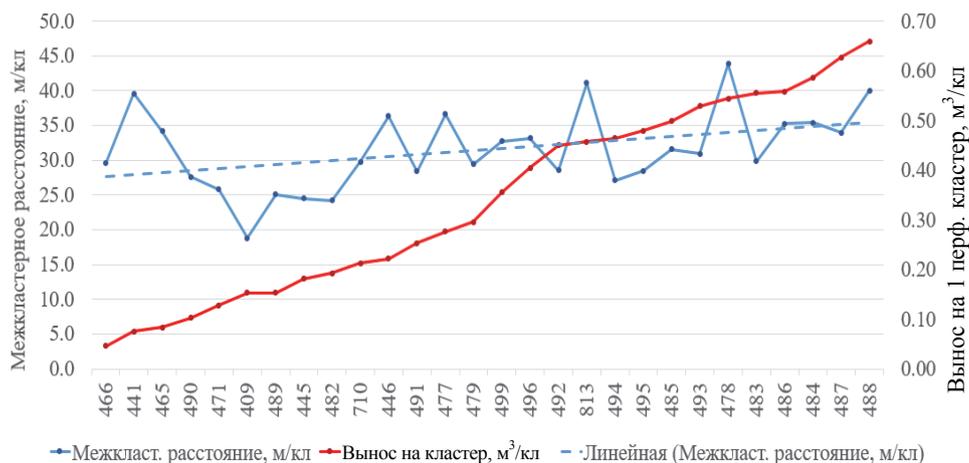


Рис. 3. Корреляция удельного выноса РА на один перфорационный кластер и среднего межкластерного расстояния

Fig. 3. Correlation of specific yield of proppants per perforation cluster and the average inter-cluster distance

Анализ зависимости интенсивности выноса РА и удельной массы РА, закачанной в один перфорационный кластер. На рис. 4 представлена информация о распределении средних удельных масс РА, закачанной на один перфорационный кластер. Анализ данных показывает, что распределение значений изменяется в диапазоне от 22,4 т/кл (скважина 465) до 35,3 т/кл (скважина 409), разброс значений составляет ~ 37 %. Корреляция между сравниваемыми показателями значительно снижена, экстремумы кривой удельной массы закачанного на кластер РА расположены хаотически, линейный тренд кривой имеет незначительный наклон ~ 3 %.

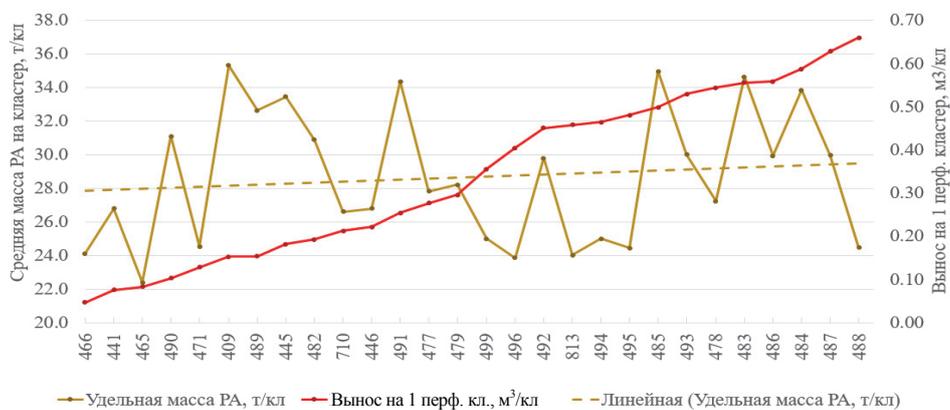


Рис. 4. Корреляция удельного выноса РА на один перфорационный кластер и удельной массы РА, закачанной в один перфорационный кластер

Fig. 4. Correlation of specific yield of proppants per perforation cluster and specific mass of proppant injected into one perforation cluster

Анализ влияния удельного объема используемого соляно-кислотного состава и интенсивности выноса РА. На рис. 5 представлена информация о среднем удельном объеме КС на один перфорационный кластер. Анализ данных показывает, что распределение значений изменяется в диапазоне от 0,6 м³/кл (скважина 710) до 6,2 м³/кл (скважина 477), разброс составляет ~ 92 %. Тенденция прямой зависимости выноса

РА от удельного объема КС на один перфорационный кластер носит невыраженный характер: в левой части графика (с низким и средним выносом РА) присутствует крайне высокий разброс значений удельного объема КС на кластер, не предполагающий наличие корреляции, в то время как в правой части графика (средний и высокий вынос РА) общий тренд кривой сохраняется практически горизонтальным, что также указывает на отсутствие зависимости; при этом сам линейный тренд данной кривой имеет выраженный наклон $\sim 57\%$, что указывает на присутствие влияния.

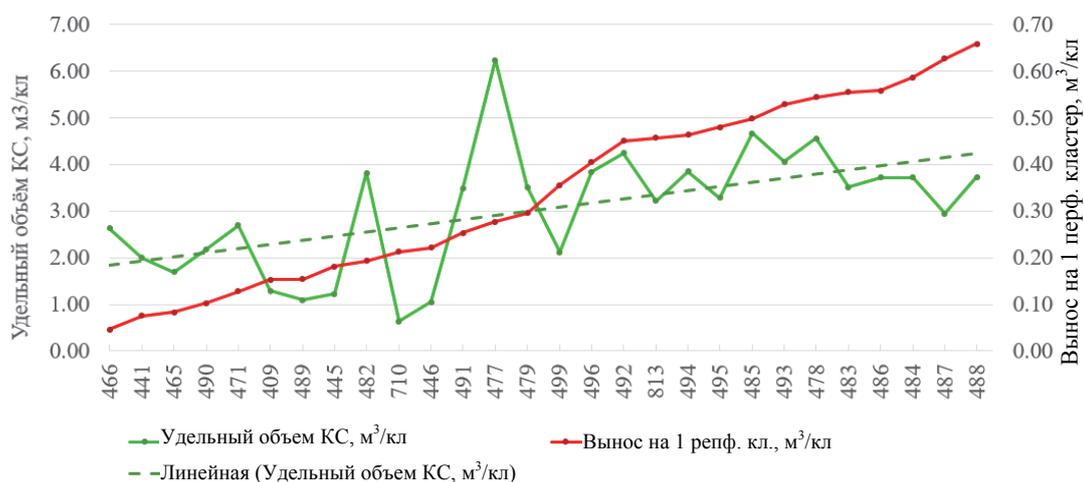


Рис. 5. Корреляция удельного выноса РА на один перфорационный кластер и удельного объема КС, закачанного в один перфорационный кластер

Fig. 5. Correlation of specific yield of proppants per perforation cluster and specific volume of cluster injected into one perforation cluster

Анализ связи удельного объема разрядки на один кластер перфорации и интенсивности выноса РА. На рис. 6 представлена информация о распределении среднего отобранного объема жидкости из одного перфорационного кластера в процессе нормализации забоев. Анализ данных показывает, что распределение значений изменяется в диапазоне от $5,8 \text{ м}^3$ (скважина 465) до $44,9 \text{ м}^3$ (скважина 478), разброс значений составляет $\sim 87\%$. При этом явных закономерностей не наблюдается, экстремумы кривой средних отобранных объемов жидкости распределены хаотично. Общую закономерность характеризует линейный тренд средних отобранных объемов жидкости из одного перфорационного кластера. Данный тренд имеет наклон $\sim 42\%$ от максимального значения и указывает на наличие выраженной связи между средним отобранным объемом жидкости из перфорационного кластера и интенсивностью выноса РА.

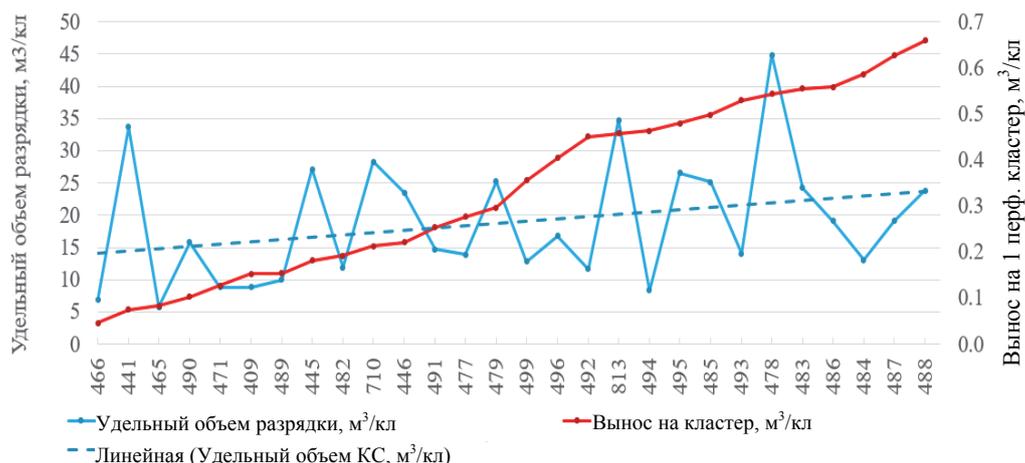


Рис. 6. Корреляция удельного выноса ПА на один перфорационный кластер и удельного объема разрядки из одного перфорационного кластера

Fig. 6. Correlation of specific yield of proppants per perforation cluster and specific volume of discharge from one perforation cluster

Анализ вероятной связи концентрации ПА и интенсивности выноса ПА. На рис. 7 представлена информация о распределении предельной концентрации ПА. Анализ данных показывает, что распределение значений изменяется в диапазоне от 450 кг/м^3 (скважины 409–465–466–471–482–489–490) до 700 кг/м^3 (скважины 445–446–477–487–493–494–495–499–710), разброс значений составляет $\sim 36\%$ от максимума. Анализируя приведенный график, необходимо отметить, что для средних и высоких значений выноса ПА характерны повышенные предельные концентрации в смеси ГРП. Линейный тренд данной кривой имеет наклон $\sim 32\%$, что указывает на наличие умеренной зависимости интенсивности выноса ПА из трещины в ствол скважины от предельной концентрации ПА в смеси ГРП.

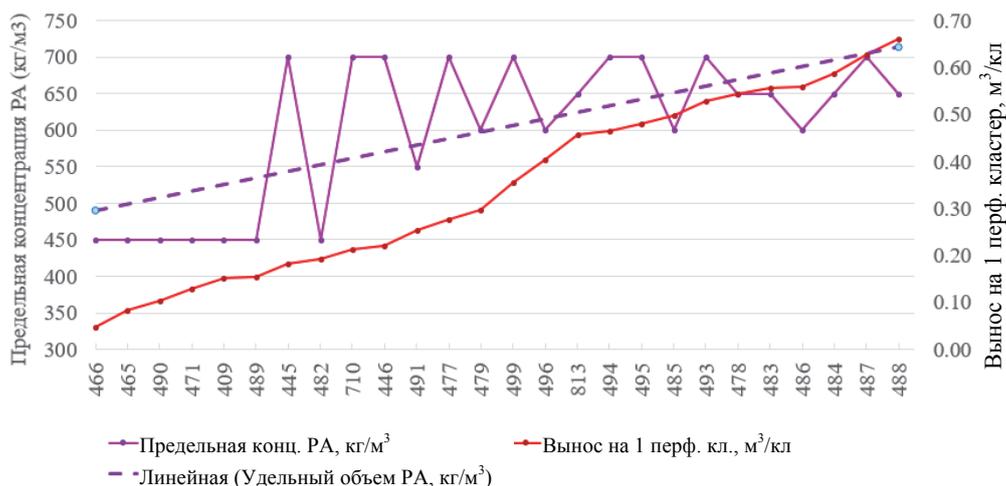


Рис. 7. Корреляция удельного выноса ПА на один перфорационный кластер и предельной концентрации ПА

Fig. 7. Correlation of specific yield of proppants per perforation cluster and limiting concentration of proppant

Для лучшего понимания причин данной корреляции рассмотрено влияние на этот процесс усредненной (по всем стадиям МГРП) концентрации РА в смеси ГРП (рис. 8). Распределение значений усредненной концентрации РА по рассматриваемым объектам менее выражено по сравнению с распределением предельной концентрации, изменяется в диапазоне значений от 410 кг/м³ (скважина 409) до 590 кг/м³ (скважина 446), разброс составляет ~ 30 %. Корреляция данной кривой и кривой интенсивности выноса РА не отмечается, что также подтверждается незначительным (~ 15 %) наклоном линейного тренда.

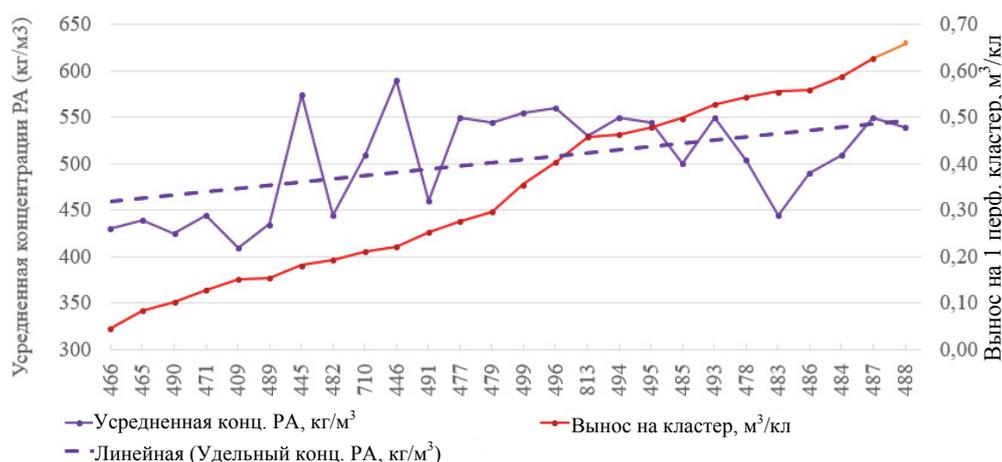


Рис. 8. Корреляция удельного выноса РА на один перфорационный кластер и усредненной концентрации РА

Fig. 8. Correlation of specific yield of proppants per perforation cluster and averaged concentration of proppant

Данная закономерность вызвана предположительно тем, что повышение предельной конечной концентрации РА в смеси ГРП способствует увеличению профиля ширины приустьевой зоны трещины, что, согласно общей теории ГРП [4], создает предпосылки к более интенсивному выносу РА в скважину, особенно в случае крайне медленного смыкания трещин ГРП (что характерно для ультранизкопроницаемых коллекторов).

Кроме того, как показывает практика, в большинстве случаев повышение концентрации производится на поздних стадиях МГРП, которые первыми подвергаются разрядке и нормализации, что также объясняет выявленную закономерность.

Оценка влияния целевой геологической формации пласта (D3ptr I-IIIп) на интенсивности выноса РА. Для определения влияния геологической формации было выполнено условное зонирование целевой зоны пласта D3ptr I-IIIп по геомеханическому напряжению (рис. 9) на следующих участках:

- западный участок (скважины 441–445–446–477–478–479–710); на данном участке фиксируются в среднем умеренные значения геомеханических напряжений;
- центральный участок (скважины 409–482–483–484–485–486–487–488–489–490–491–492–493–494–495–499–813); наблюдаются повышенные значения геомеханических напряжений;
- восточный участок (скважины 465–466–471); для этого участка характерны пониженные значения геомеханических напряжений.

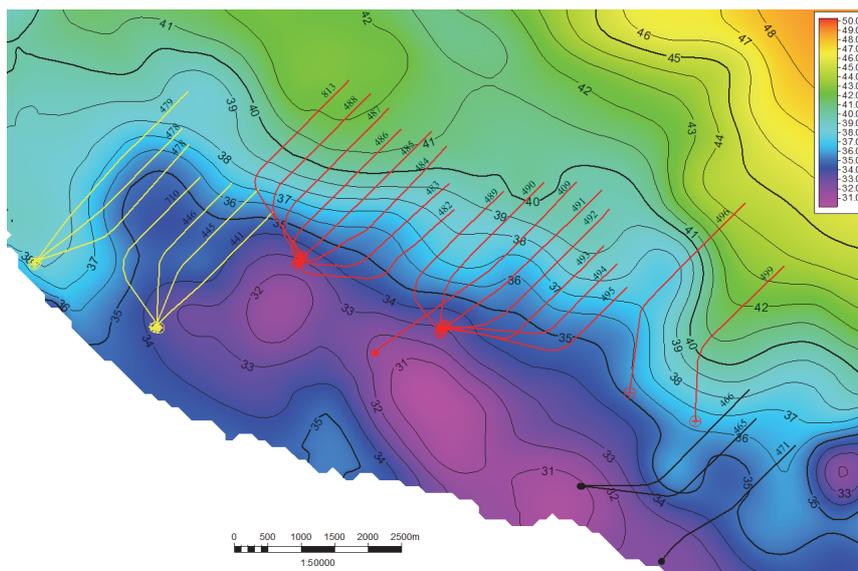


Рис. 9. Карта геомеханических напряжений по кровле I–III пачки петриковско-елецкой залежи Речицкого нефтяного месторождения

Fig. 9. Map of geomechanical stresses along the roof of the I–III members of the petrikovsko-elets deposit of the Rechitsa oil field

При этом сами скважины были разбиты на группы по признаку удельной интенсивности выноса ПА из одного кластера:

- минимальный вынос 0,05–0,1 т/кл (скважины 441–465–466–490);
- умеренный вынос 0,11–0,2 т/кл (скважины 409–445–471–429–489);
- высокий вынос 0,21–0,4 т/кл (скважины 446–477–479–491–499–710);
- катастрофический вынос 0,4 т/кл и более (скважины 478–483–484–485–486–487–488–492–493–494–495–813).

Почти все скважины с катастрофическим уровнем выноса ПА сконцентрированы в центральном участке (за исключением скважины 478), причем большинство из них являются соседними друг другу. Для проверки влияния местоположения горизонтальных участков скважин на процесс выноса были определены средние показатели выноса для каждого участка:

- западный участок, средняя интенсивность выноса ПА – 0,26 т/кл;
- центральный участок, средняя интенсивность выноса ПА – 0,42 т/кл;
- восточный участок, средняя интенсивность выноса ПА – 0,09 т/кл.

В результате выполненного многофакторного анализа были сделаны следующие выводы:

1. Прослеживается влияние удельного объема КС на интенсивность выноса ПА в скважину. Данная закономерность вызвана предположительно тем, что при закачке КС происходит не только очистка ИП и ПЗП от механических карбонатных частиц, но и травление заколонного цемента/разуплотнение пород в ПЗП, что создает обширные полости, где может оставаться некоторая масса свободного (незакрепленного) ПА, а также снижает качество упаковки ПА в приустьевой зоне трещины.

2. Прослеживается влияние предельной концентрации ПА в смеси ГРП на интенсивность его выноса из трещины в скважину. Повышение конечной концентрации ПА в смеси ГРП способствует увеличению ширины приустьевой зоны трещины, что, согласно общей теории ГРП [4], создает предпосылки к более интенсивному выносу ПА в скважину потоком отбираемого флюида.

3. Прослеживается зависимость интенсивности выноса РА от геологической формации месторождения. В центральном участке пласта D3ptg I-IIIп зафиксирован наиболее высокий средний вынос расклинивающего агента (0,42 т/кл), что существенно превышает показатели западного (0,26 т/кл) и восточного (0,09 т/кл) участков. Ключевой причиной этого являются повышенные геомеханические напряжения, характерные для данной зоны. Повышенные напряжения негативно влияют на устойчивость созданных при ГРП трещин: ускоряют их смыкание после снижения порового давления, провоцируют деформацию вмещающих пород и снижают проницаемость пласта. В результате РА не успевает надежно закрепиться в трещине, а сформированная проппантная пачка оказывается менее устойчивой к потоку флюида, что и приводит к интенсивному выносу РА.

4. Прослеживается влияние предельного объема разрядки на один кластер перфорации и среднего отобранного объема жидкости из перфорационного кластера, и интенсивности выноса РА. Данная закономерность обусловлена тем, что интенсификация отбора скважинной жидкости при разрядке (в том числе в сверхкритических режимах) создает более мощный поток флюида, который оказывает повышенное гидродинамическое воздействие на проппантную пачку в трещине. Это приводит к снижению устойчивости РА, особенно в приустьевой зоне, и способствует его более активному выносу в ствол скважины.

Заключение. В ходе исследования был проведен последовательный анализ влияния отдельных факторов на процессы выноса РА при МГРП. Такой подход позволил поэтапно изучить роль каждого параметра, выявить ключевые закономерности и наметить направления для совершенствования технологии.

На основании выявленных закономерностей, в рамках дальнейших исследований, предлагается апробировать дифференцированные технологические решения для различных участков месторождения:

– центрального участка – технология закачки РА с пониженной концентрацией ($400\text{--}450\text{ кг/м}^3$) для минимизации выноса при высоких геомеханических напряжениях;

– западного участка – технология двухуровневого контроля концентрации: поддержание предельного значения в диапазоне $550\text{--}600\text{ кг/м}^3$ при оперативном регулировании усредненного показателя на уровне $450\text{--}500\text{ кг/м}^3$;

– восточного участка – технология поэтапного повышения концентрации РА до $650\text{--}700\text{ кг/м}^3$ (с плавным наращиванием) при поддержании усредненной концентрации $500\text{--}600\text{ кг/м}^3$.

– на всех участках реализация режима сниженной интенсивности отбора жидкости (15–20 % от стандартного).

В ходе испытаний на месторождениях будет организован непрерывный мониторинг ключевых параметров. Это позволит получить достоверные данные об эффективности предложенной технологии.

Полученные результаты сформируют научную основу для совершенствования технологий ГРП/МГРП при разработке нетрадиционных запасов углеводородов и определят приоритетные направления дальнейших исследований в данной области.

Литература

1. Бобков, Д. О. Проблемы, возникающие при проведении ГРП, и возможности их решения // Современные научные исследования и инновации – 2017. – № 7. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2017/07/84111>.
2. Махнач, А. А. Очерк геологии Беларуси / А. А. Махнач, А. В. Кудельский. – Минск : Беларус. навука, 2019. – С. 171.

3. Ерошенко, А. А. Изучение дальнейшей перспективы освоения низкопроницаемых нетрадиционных пород-коллекторов отложений I–III пачки Речицкого месторождения; исследование перспектив нефтегазоносности отложений елецко-петриковского возраста северной зоны (заключ.) : отчет о НИР / БелНИИнефть. – Гомель, 2024. – С. 231.
4. Экономидес, М. Унифицированный дизайн гидроразрыва пласта: от теории к практике / Р. Олини, П. Валько. – М. ; Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2007. – С. 26.
5. Анализ технологии проведения ГРП на месторождениях ОАО «Сургутнефтегаз» / А. Г. Малышев, В. Н. Журба, Н. Н. Сальникова // Нефтяное хозяйство. – 1997. – № 9. – С. 46–52.

References

1. Bobkov D. O. Problems arising during hydraulic fracturing and their solutions. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii*, 2017, no. 7. Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2017/07/84111> (in Russian).
2. Makhnach A. A., Kudelsky A. V. *Essay on the Geology of Belarus*. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2019, 171 p. (in Russian).
3. Eroshenko A. A. *Study of the further development prospects of low-permeability unconventional reservoir rocks of the I–III members of the Rechitsa field; study of the oil and gas potential of the Yelets–Petrikovskian sediments of the northern zone* (conclusion). Gomel, BelNINeft Publ., 2024. 231 p. (in Russian).
4. Economides M., Olaini R., Valko P. *Unified Hydraulic Fracturing Design: From Theory to Practice*. Moscow, Izhevsk, Institut komp'juternyh issledovaniy, 2007. 26 p. (in Russian).
5. Malyshev A. G., Zhurba V. N., Sal'nikova N. N. Analysis of hydraulic fracturing technology at the fields of Surgutneftegas OJSC. *Neftjanoe hozjajstvo*, 1997, no. 9, pp. 46–52 (in Russian).

Информация об авторах

Дубина Дмитрий Александрович – инженер-технолог 2 категории лаборатории гидравлического разрыва пласта. Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» (ул. Книжная, 15Б, 246003, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: d.dubina@beloil.by

Синецкий Роман Васильевич – инженер-технолог 1 категории лаборатории гидравлического разрыва пласта. Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» (ул. Книжная, 15Б, 246003, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: r.sineckij@beloil.by

Войтехин Олег Леонидович – ведущий инженер-технолог лаборатории гидравлического разрыва пласта. Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» (ул. Книжная, 15Б, 246003, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: o.voitehin@beloil.by

Information about the authors

Dubina Dzmitry Alexandrovich – engineer-technologist of the 2nd category at the hydraulic fracturing laboratory. Belarusian Scientific Research and Design Institute of Oil RUE “Production Association “Belorusneft” (15B, Knizhnaya Str., 246003, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: d.dubina@beloil.by

Sinetsky Roman Vasilievich – engineer-technologist of the 1st category at the hydraulic fracturing laboratory. Belarusian Scientific Research and Design Institute of Oil RUE “Production Association “Belorusneft” (15B, Knizhnaya Str., 246003, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: r.sineckij@beloil.by

Voitekhin Oleg Leonidovich – senior engineer-technologist at the hydraulic fracturing laboratory. Belarusian Research and Design Institute of Oil RUE “Production Association “Belorusneft” (15B, Knizhnaya Str., 246003, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: o.voitehin@beloil.by

Поступила в редакцию 22.08.2025