

УДК 622.276.6

**ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ВЫНОСА ПРОППАНТА ИЗ ТРЕЩИН
ГИДРОРАЗРЫВА, ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ
ПЛАСТОВ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТОВ****А. В. Минаков, А. Ю. Кравченко, Я. А. Майлат, С. Н. Воробьёва***БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение
«Белоруснефть», г. Гомель*

Рассмотрена методика расчета оптимального дебита скважины после проведения гидроразрыва пластов для учета негативного влияния выноса проппанта из трещин гидроразрыва. Проведена оценка достоверности предложенной методики, а также промоделировано влияние расклинивающих агентов различной проницаемости на эффективность освоения скважины.

Ключевые слова: ГРП, вынос проппанта, гидродинамическая модель, трещина ГРП, расклинивающий агент, критический дебит.

**ASSESSMENT OF PROPPANT REMOVAL CONDITIONS
FROM HYDRAULIC FRACTURING CRACKS, ITS IMPACT
ON FORMATION PRODUCTIVITY AND FRACTURING EFFICIENCY****A. Minakov, A. Kravchenko, Y. Majlat, S. Vorobyova***BelNIPIneft RUF “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

The paper examines a method for calculating the optimal flow rate of a well after hydraulic fracturing to take into account the negative impact of proppant removal from hydraulic fractures, assesses the reliability of the proposed method, and models the impact of proppant agents of varying permeability on the efficiency of well development.

Keywords: hydraulic fracturing, proppant removal, hydrodynamic model, hydraulic fracturing crack, proppant, critical flow rate.

Среди факторов, снижающих эффективность гидроразрыва пластов (ГРП), наибольшей проблемой, приводящей к снижению их продуктивности, является вынос проппанта из трещины [1]. После выноса проппанта трещина теряет способность поддерживать необходимую проводимость, что приводит к уменьшению продуктивности пласта. Помимо этого незакрепленные частицы расклинивающего материала, поступая с добываемым флюидом в скважину, могут привести к повреждению насосного оборудования. На текущий момент не существует принятой рабочей методики, которая бы позволила описать процесс взаимодействия частиц расклинивающего агента с трещиной в пластовых условиях, а состояние агента в пласте за пределами ствола скважины имеет неопределенности, которые невозможно определить при лабораторных испытаниях. Ежегодно РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» увеличивает количество проводимых ГРП и их стадийность, что указывает на необходимость создания аналитической модели выноса проппанта.

На первом этапе наших исследований были проанализированы зарубежные работы по анализу и расчету выноса проппанта в эксплуатирующихся после ГРП скважинах. Были выделены 3 основные методики: модель Уэджа, модель Кэнона [2] и модель В. А. Васильева [3], однако в связи с высокой неопределенностью закладываемых параметров модели Кэнона и Уэджа после апробирования далее не использовались. Модель В. А. Васильева основывается на теории псевдосжижения сыпучих материалов и используется для описания процесса пескования скважин, эксплуатирующих слабосцементированные пласты [3].

Условие выноса проппанта из трещины гидроразрыва определяется критическим дебитом пластовой жидкости при ее фильтрации. Когда фактический дебит жидкости превышает критическое значение, начинается вынос проппанта из трещины.

Критический дебит рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{крит}} = \frac{K_{\alpha} g(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ф}}) K_{\text{проп}} G_{\text{пр}} n_{\text{тр}}}{\mu_{\text{ж}} l_{\text{тр}} \rho_{\text{нас}}}, \quad (1)$$

K_{α} – коэффициент упаковки проппанта; $\rho_{\text{п}}$ – плотность зерна проппанта; $\rho_{\text{ф}}$ – плотность флюида; $K_{\text{проп}}$ – проницаемость проппанта; $G_{\text{пр}}$ – вес закачанного проппанта; $n_{\text{тр}}$ – число трещин; $\mu_{\text{ж}}$ – вязкость жидкости; $l_{\text{тр}}$ – длина трещины; $\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность проппанта.

В результате расчетов по аналитической модели В. А. Васильева для условий месторождений Припятского прогиба построен график, описывающий закономерности изменения критического дебита скважины от изменения входных параметров (рис. 1).

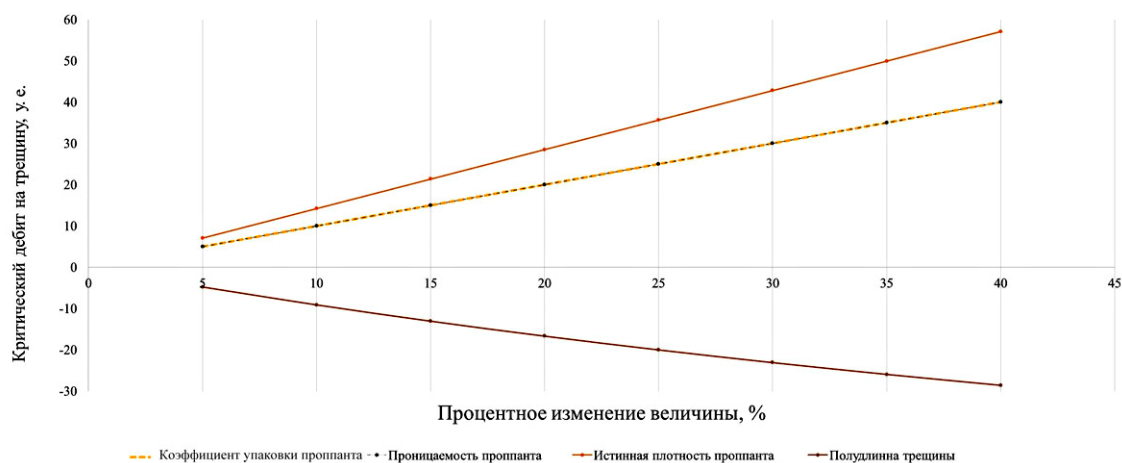


Рис. 1. График изменения критического дебита в зависимости от контролируемых параметров

К увеличению критического дебита приводят истинная плотность проппанта, коэффициент упаковки проппанта и его проницаемость (рост данных параметров ведет практически к линейному росту критического дебита). Наибольшее влияние на критический дебит скважины оказывает истинная плотность проппанта.

Методика В. А. Васильева позволяет наиболее точно рассчитать критический дебит скважины. При этом ожидаемый дебит после проведения многостадийного ГРП разделяется равными долями между всеми трещинами. Для учета геометрической неоднородности трещин используется методика предельного потенциала, на основе которой рассчитывается проводимость системы «матрица – трещина», и это позволяет рассчитать долю участия каждой трещины в добыче пластового флюида. Сравнение фактического и критического дебита жидкости происходит по каждой трещине отдельно.

Пример практического применения методики Васильева для освоения скважины 445g Речицкая методом 27-стадийного МГРП по технологии Plug & Perf представлен на рис. 2. В соответствии с дизайн-проектом вынос проппанта следует ожидать по 1 кластеру 26 стадии (рис. 2) при превышении расчетного дебита по скважине свыше $35 \text{ м}^3/\text{сут}$ ($31 \text{ т}/\text{сут}$) и нулевой обводненности



Рис. 2. Критический дебит жидкости по стадиям для скважины 445g Речицкая, при котором вероятен вынос проппанта

На основе проведенных расчетов по 36 скважинам, в которых проводилось ГРП в 2023–24 гг., было установлено, что модель с большой долей вероятности дает возможность предсказать вынос проппанта из скважины (рис. 3). Из рис. 3 можно заметить, что имеется большое количество скважин, по которым произошел фактический вынос проппанта. Один из возможных процессов, который привел к данному явлению, – это разрядка скважины, проводимая после ГРП [4]. Данный эффект обуславлен большой разницей значений проницаемости между пластом и проппантом, который и приводит к большому перепаду давлений «пласт – трещина».



Рис. 3. Анализ совпадения модельных и фактических данных по выносу расклинивающего агента

В мировой практике при проведении ГРП в качестве замены керамического проппанта применяются природные материалы с целью снижения затрат при проведении операции. В связи с этим были проведены исследования по влиянию проницаемости различных материалов на продуктивность скважины. Для оценки этого влияния была осуществлена серия расчетов на гидродинамических моделях в симуляторе tNavigator посредством создания виртуальной трещины. За основу была принята секторная модель по скважине 57g Северо-Домановичской, в которой прово-

дился ГРП. На гидродинамической модели рассчитаны 9 вариантов с различной проницаемостью расклинивающих агентов [5], проницаемость которых составляет от 4 Д (песок ГОК Западно-Хотиславского месторождения 40/70 со степенью разрушения 70 %) до 2200 Д (пропант Carbo Pro 12/18).

По результатам расчета разница в накопленной добыче нефти за два года при использовании для ГРП расклинивающего агента с минимальной и максимальной проницаемостями составит 23 % (рис. 4). При замене керамического проппанта на песок экономическая эффективность при проведении ГРП на одну стадию составит 6000 BYN только за счет разницы стоимости материалов. Экономия на одну стадию при сравнении песка фракции 40/70 с проппанта фракции 40/70 равна 4200 BYN. Таким образом, замена расклинивающих агентов снизит накопленную добычу нефти, но с учетом заметной разницы в стоимости применение песка экономически целесообразнее.

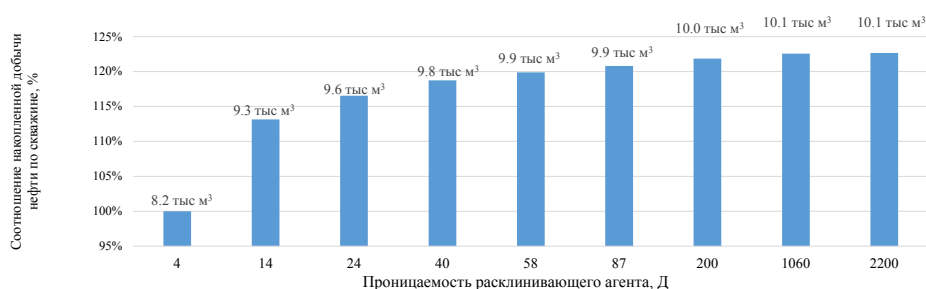


Рис. 4. Сравнение накопленной добычи нефти после гидроразрыва пластов для различных значений проницаемости проппанта

Разница в продуктивности скважины отражена на рис. 5, где представлен дебит за первый месяц эксплуатации скважин после ГРП при использовании наиболее часто применяемых расклинивающих агентов. Как видно из графика, увеличение проницаемости после значений в 30 Д приводит к росту начального дебита не более, чем на 10 %.

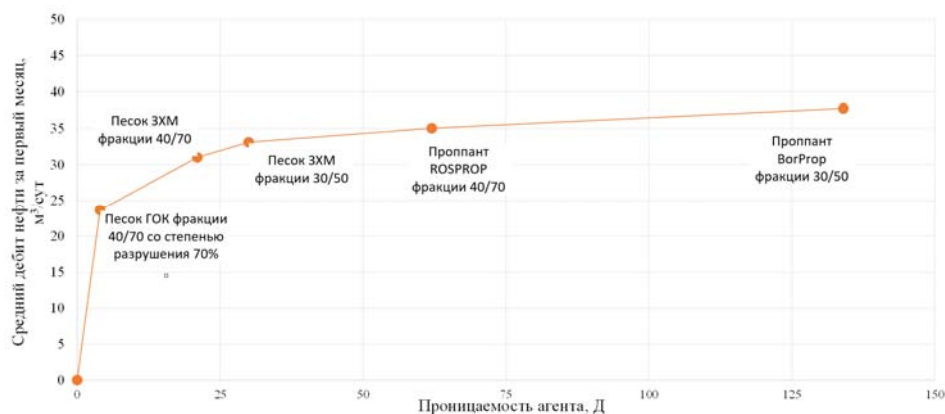


Рис. 5. Начальный дебит скважины при различной проницаемости агента

Одним из преимуществ замены проппанта на песок является значительное снижение выноса агента. Эффект достигается за счет естественного снижения проницаемости, что приводит к снижению пиковых значений дебита.

Литература

1. Бобков, Д. О. Проблемы, возникающие при проведении ГРП, и возможности их решения / Д. О. Бобков // Современные научные исследования и инновации. – 2017. – № 7. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2017/07/84111> (дата обращения: 05.10.2024).
2. Avoiding Proppant Flowback in Tight-Gas Completions with Improved Fracture Design / Javier M. Canon, Diego J. Romero, Tai T. Pham, Peter P. Valko // SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado, USA, 5–8 Oct. 2003. – SPE 84310.
3. Васильев, В. А. Оценка устойчивости заполнителя трещины при гидроразрыве пласта / В. А. Васильев // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2010. – № 4 (25).
4. Верисокин, А. Е. Сокращение сроков освоения скважины после проведения гидроразрыва пласта / А. Е. Верисокин // Наука. Инновации. Технологии. – 2018. – № 3. – URL: <https://scienceit.elpub.ru/jour/article/view/184> (дата обращения: 05.10.2024).
5. Оценка возможности применения карьерных песков Республики Беларусь в качестве расклинивающих агентов ГРП / А. Л. Богданов [и др.] // Поиск и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь : сб. науч. тр. : в 2 т. / Концерн «Белнефтехим», Произв. об-ние «Белоруснефть», Белорус. науч.-исслед. и проект. ун-т нефти ; под. ред. В. Д. Порошин. – Минск, 2022. – Т. 2, вып. 10. – С. 48–57.

УДК 622.276.66

ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН С ГИДРОРАЗРЫВОМ ПЛАСТА НА ДОБЫЧУ НЕФТИ

А. М. Жуковский, Р. Е. Гутман

БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение
«Белоруснефть», г. Гомель

Раскрыто, что истощение традиционных залежей углеводородов и длительная эксплуатация месторождений приводит к необходимости применения новых способов разработки месторождений нефти. Представлено, что один из таких способов – использование скважин с горизонтальным окончанием и последующим их освоением методом многостадийного гидроразрыва пласта. Это позволяет увеличить объем добычи нефти, а на объектах с трудноизвлекаемыми запасами является единственным рентабельным способом их разработки. Значительное влияние на объем добычи нефти оказывает вектор направления распространения трещин относительно ствола скважины. И как следствие – объем стимулированной породы. Подтверждена взаимосвязь накопленной добычи нефти с направлением бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин относительно векторов максимального горизонтального напряжения.

Ключевые слова: геомеханическое моделирование, гидравлический разрыв пласта, наклонно-направленное бурение, горизонтальное бурение, вектор главных горизонтальных напряжений.

THE INFLUENCE OF WELLS DRILLING DIRECTION WITH HYDROFRACTURING COMPLETION ON THE WELL CUMULATIVE OIL PRODUCTION

A. M. Zhukouski, R. E. Gutman

BelNIPIneft RUF “Production Association “Belorusneft”, Gomel

Depletion of traditional hydrocarbon deposits and long-term exploitation of fields leads to the use of new methods for developing oil fields. One of such methods is horizontal wells drilling and their subsequent multi-stage hydraulic fracturing completion. This approach allows increasing