

УДК 622.279

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОППАНТОВ
НА ПРОВОДИМОСТЬ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА**

Ян Ин^{1,2}, Фу Цяофэй¹, Юань Хайюнь³, М. П. Хайдина⁴, Вэй Цзянгуан¹

¹Северо-восточный нефтяной университет, 163318, г. Дацин, Китай

²Научно-исследовательский институт нефтедобычи Дацинское нефтяное месторождение,

E-mail: yuainngg@126.com, 163453, г. Дацин, Китай

³КННК “Интернационал” (Туркменистан), 744000, г. Ашхабад, Туркменистан

⁴Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина,
Ленинский проспект, 65, к. 1, 119991, г. Москва, Россия

Исследовано влияние параметров проппантов на долговременную проводимость трещин гидроразрыва пласта. Вдавливание проппантов в стенки трещины и их раздавливание изучены системой определения проводимости трещины FCMS-V с помощью автоэмиссионного сканирующего микроскопа, поляризационного микроскопа и методом ситового анализа. Выявлены зависимости проводимости от размера гранул, гранулометрического состава, концентрации и способа размещения проппантов, давления смыкания трещины и вдавливания проппантов в стенки трещины. Подробно рассмотрены вопросы вдавливания и раздавливания проппантов различного размера гранул под разным давлением смыкания трещины. Даны рекомендации по размещению проппантов при гидроразрыве пласта в условиях добычи метана угольных пластов на участке УС бассейна Ordos (Китай).

Экспериментальное исследование, метан угольных пластов, проводимость трещин гидроразрыва пласта, вдавливание проппантов, раздавливание проппантов

DOI: 10.15372/FTPRI20230510

Экономичная добыча нефти и газа из плотных и нетрадиционных пластов стала возможной благодаря развитию технологий гидроразрыва пласта (ГРП) [1, 2]. Во время ГРП проппанты (расклинивающие материалы) транспортируются жидкостями гидроразрыва в образованные трещины и создают проницаемую пачку проппантов, которая закрепляет трещины в раскрытом состоянии после снятия избыточного давления и представляет собой путь для потока пластовых флюидов к стволам скважин [3]. Возможности трещины транспортировать жидкость к стволу скважины обусловлены ее пропускной способностью — проводимостью, поэтому формирование трещины с высокой проводимостью является ключевым моментом при проведении операций ГРП [4, 5]. Свойства проппантов в значительной степени определяют долговременную проводимость трещины, что напрямую влияет на эффект гидроразрыва. Таким образом, данные о проводимости трещины с проппантами важны в процессе проектирования ГРП.

Работа выполнена при поддержке фонда развития постдокторских научных исследований Хэйлунцзян, Китай (грант № LBH-Z21084), проекта планирования научно-технического развития Дацина (грант № zd-2021-36), постдокторского научного фонда Китая (грант № 2022M710594).

Проводимость трещины ГРП определяется произведением проницаемости и ширины трещины. В ходе лабораторного эксперимента проницаемость трещины можно рассчитать согласно закона Дарси путем измерения разницы давлений между входом и выходом и геометрии трещины по соотношению $kW_f = 100\mu QL / w\Delta p$, где k — проницаемость закрепленной трещины проппантами, Д; W_f — ширина трещины, см; μ — вязкость жидкости при температуре эксперимента, мПа·с; Q — расход жидкости через трещину, см³/с; L — длина между точками измерения давления, см; w — ширина ячейки проводимости, см; Δp — перепад давления, кПа.

К физическим характеристикам проппантов, которые влияют на проводимость трещины, относятся такие параметры, как прочность, качество (наличие примесей), размер гранул и гранулометрический состав, форма гранул (сферичность и округлость). Помимо параметров самих проппантов, на проводимость трещины также оказывают влияние давление смыкания трещины ГРП, температура пласта, вдавливание проппантов в стенки трещины, остатки жидкости разрыва в трещине и т. д.

Высокое давление смыкания трещины, действующее на проппанты, может раздавить их на более мелкие кусочки в обрабатываемом твердом пласте, о чем свидетельствуют исследования обратного потока после гидроразрыва и эксперименты в лабораториях [6, 7]. Раздавливание частиц проппантов приводит к снижению пропускной способности трещины, так как уменьшается размер гранул проппантов и пористость проппантной пачки. По сравнению с нетрадиционными коллекторами, такими как плотные и сланцевые, метаноугольные пласты обычно залегают на небольшой глубине [8], поэтому требование к прочности проппантов невысокое. Наиболее широко используемым проппантом для закрепления трещин в угольных пластах, где напряжение сжатия не превышает 40 МПа, являются кварцевые пески [6].

Метаноугольные месторождения, как правило, многопластовые, и неоднородны прежде всего по давлению смыкания и другим коллекторским свойствам. Требуемая проводимость трещины на разных участках разная. Кроме того, при одинаковом способе размещения одних и тех же проппантов проводимость может сильно различаться на разных месторождениях, отчего каждый участок нуждается в индивидуальном подходе оценки проводимости трещины, зависящем от уникальных геолого-геофизических условий месторождения. Существуют следующие методы оценки проводимости: эмпирический метод, численное моделирование [9, 10], теоретический расчет [11, 12], метод анализа данных ГДИС (гидродинамическое исследование скважин) и лабораторный эксперимент [13, 14]. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки:

- эмпирический метод прост и удобен в реализации, но имеет большие погрешности и предъявляет высокие требования к проектировщикам ГРП;
- метод численного моделирования требует большого количества исходных входных параметров, и неточность любого параметра может привести к значительной погрешности; кроме того, применимость модели к различным свойствам коллектора и параметрам ГРП нуждается в дальнейшем исследовании;
- к достоинствам метода теоретического расчета следует отнести его универсальность, но при этом приняты слишком идеализирующие допущения и результаты расчета не способны отражать характеристики пласта и проппантов, чем ограничена его значимость;
- метод анализа данных ГДИС, по сравнению с другими методами, требует больше трудовых, материальных и финансовых ресурсов. Оценку можно проводить только после завершения операции ГРП, поэтому, если первоначальный способ размещения проппантов нецелесо-

образен, то неизбежны экономические потери. Геологическое строение и напряженные состояния в угольном пласте сложны, существует множество факторов, влияющих на проводимость трещины, и невозможно провести однофакторный анализ проводимости;

- лабораторные эксперименты — прямые и эффективные способы оценки проводимости. При этом можно оценить влияние многих факторов на проводимость, а также непосредственно получить результаты раздавливания частиц проппантов и вдавливания проппантов в стенки трещины. Недостатки метода заключаются в том, что он требует отбора кернов и предъявляет высокие профессиональные требования к лабораторному оборудованию эксперимента.

После 1980-х годов для экспериментального исследования проводимости трещин ГРП широко использовалось лабораторное устройство с линейным потоком, рекомендованное в API RP-61 [15–17]. По сравнению с устройством с радиальным потоком, смоделированный таким устройством режим потока больше соответствует реальной ситуации в созданных трещинах при ГРП. Полученные в результате исследования данные проводимости трещины используются не только для оценки качества проппантов и эффективности проведения ГРП, но и в качестве входных параметров компьютерных программ для теоретических расчетов и проектирования ГРП.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки проводимости трещин ГРП и характеристик проппантов в ходе экспериментального исследования учтены четыре стандарта, включая два стандарта ISO и два китайских стандарта. В стандартах ISO 13502-5 [18] и NB/T14023-2017 [19] для измерения проницаемости и проводимости трещины ГРП используется ячейка проводимости с проппантом, заделанным между двумя поверхностями плиток кернов. В ходе эксперимента фильтрация жидкости через трещину с проппантом длится более 50 ч. В стандартах ISO 13503-2 [20] и SY 17125-2019 [21] измеряют гранулометрический состав, сферичность гранулы и мутность, а также включается оценка сопротивления раздавливанию расклинивающего материала путем измерения процентной доли мелких частиц, образующихся при сжимающем напряжении.

Оборудование для определения проводимости трещины. Использовалась система определения проводимости трещины ГРП FCMS-V, ячейка проводимости которой разработана по стандарту API RP-61. С помощью этой системы эксперимент выполняется при различных давлениях и температурах, моделирующих пластовые, а полученные данные могут оценить качество и эффективность использования проппанта при ГРП, измеряя ширину трещины (толщину проппантной пачки), температуру ячейки и рабочей жидкости, расход и перепад давлений через ячейку проводимости. Система позволяет задавать расходы до 10 мл/мин при постоянном давлении до 40 МПа. Расход рабочей жидкости измеряется электронными весами, подключенными к компьютеру. Давление смыкания трещины при этом определяется в пределах 0–150 МПа (точность измерения 0.01 МПа). Температура регулируется от 20 до 200 °С (точность измерения 0.1 °С) посредством предварительного подогревателя жидкости и регулировкой термопары, контролирующей температуру ячейки. В ходе эксперимента автоматически измеряется дифференциальное давление по длине ячейки (точность датчика перепада давления 0.01 кПа) и ширина трещины (точность датчика смещения 0.001 мм).

Компьютер с программным обеспечением (система сбора и обработки информации и управления) автоматически регистрирует температуры жидкости и ячейки, давления смыкания трещины и расходы в процессе эксперимента. Система записывает все данные, измеренные в процессе эксперимента, а также проводимость трещины, проницаемость проппантной пачки и ширину трещины в режиме реального времени. Схема системы определения проводимости трещины ГРП приведена на рис. 1.

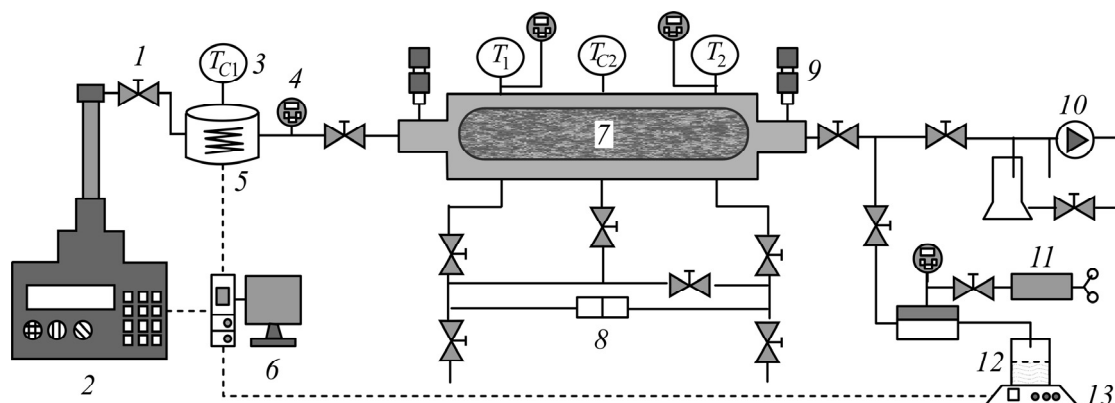


Рис. 1. Схема системы определения проводимости трещины ГРП: 1 — клапан; 2 — насос; 3 — термометр; 4 — манометр; 5 — нагревательная система; 6 — система хранения и контроля данных; 7 — ячейка проводимости трещины; 8 — датчик перепада давления; 9 — датчик смещения; 10 — вакуумный насос; 11 — ручной насос; 12 — клапан противоаварийного сброса; 13 — система сбора жидкости

Материалы для экспериментальных исследований. Эксперименты со стальными пластинами не могут отражать реальную ситуацию в породном пласте. Даже при использовании кернов, если пустотное пространство между пластинами кернов и внутренней стенкой ячейки проводимости неэффективно герметизировано, возникают большие погрешности расчетов проводимости трещины. Чтобы получить долговременную проводимость трещины в условиях, близких к пластовым, в этом исследовании применяются пластины кернов, извлеченных из угольного пласта, а также стальные пластины для определения влияния вдавливания проппантов в стенки трещины на проводимость.

Проппанты, используемые в процессе эксперимента, представляют собой кварцевые пески CF с размерами гранул 30/50, 40/70 и 70/140 меш, которые широко применяются в бассейне Ordos для добычи метана. В качестве рабочей жидкости используется 2 % водный раствор хлорида калия. Полноразмерные керны, извлеченные из угольного пласта ЕТ участка УС бассейна Ordos, обработаны под размер ячеек.

Способы подготовки ячейки проводимости и размещения проппантов показаны на рис. 2. Так как в угольной породе развита система естественных трещин (кливажей), сложно получить целый керн длиной более 17,78 см. Поэтому сначала вырезным станком режут две пластины угольного керна (рис. 2а), затем их наклеивают сульфидированным силиконовым клеем (температуростойкость выше 200 °С, время затвердевания при 20 °С менее 24 ч). Для герметизации пустотного пространства между пластинами кернов и внутренней стенкой ячейки проводимости необходимо равномерно нанести сульфидированный силиконовый клей на боковые стороны пластин, за исключением входного, выходного отверстий и места трех точек измерения давления (рис. 2а). Металлические прокладки используются для предотвращения протекания жидкости через поршни.

Процесс эксперимента по определению проводимости трещин.

- Нижняя стальная прокладка, нижняя пластина керна, верхняя пластина керна и верхняя стальная прокладка помещаются в ячейку, давление на пластины увеличивается до давления смыкания трещины ГРП, записывается исходное положение нижней пластины керна для определения ширины трещины.

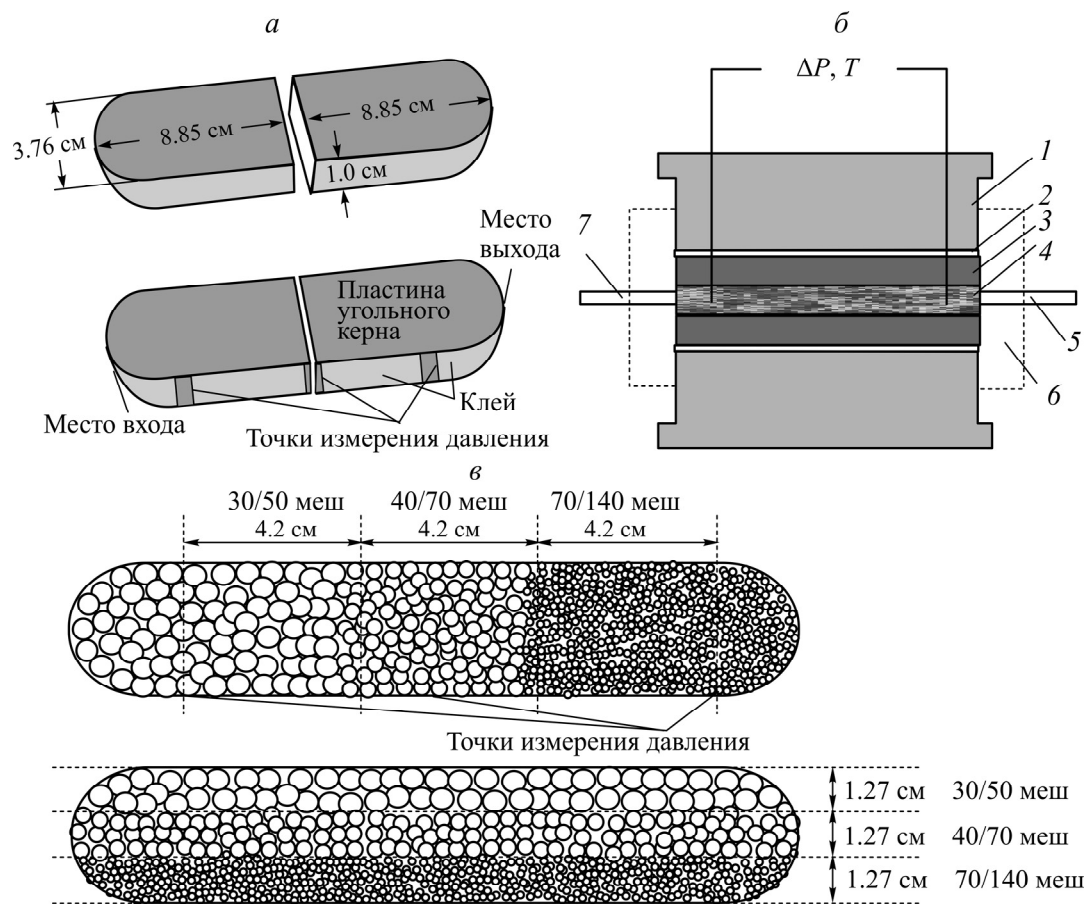


Рис. 2. Способы подготовки ячейки проводимости и размещения проппантов (а); б — схема модели трещины ГРП (проппантной упаковки): 1 — поршень; 2 — стальная прокладка; 3 — пластина угольного керна; 4 — проппантная упаковка; 5 — выход ячейки проводимости; б — ячейка проводимости; 7 — вход ячейки проводимости; в — продольное и поперечное размещение проппантов вдоль трещины

- Стальные прокладки и пластины керна выталкиваются из ячейки, равномерно наносится сульфидированный силиконовый клей на боковые стороны пластин.

- Нижняя стальная прокладка и нижняя пластина керна помещаются в ячейку, туда засыпаются проппанты соответствующей фракции с необходимой концентрацией и пропорцией. Верхняя пластина керна и верхняя стальная прокладка помещаются в ячейку, поршни вместе с резиновыми кольцами устанавливаются в исходном положении (рис. 2б).

- Между валиками пресса помещается ячейка, которую затем вакуумируют в течение часа. Объем, который вакуумируется в этом эксперименте, равен объему проппантной упаковки и составляет примерно 37 см^3 .

- Вся система насыщается двухпроцентным деаэрированным соляным раствором KCl. Давление увеличивается до 5 МПа, и проверяется герметичность системы.

- Ячейка нагревается до необходимой температуры с помощью датчиков и регуляторов температуры. Давление на поршни повышается до заданного значения. В ходе эксперимента обратное давление (давление жидкости в системе) поддерживается на уровне 2 МПа клапаном противодействия, расположенным на выходе из измерительного блока. Эффективное напряжение смыкания на 2 МПа меньше давления на поршни. В процессе тестирования задается постоянное значение расхода насоса 2 мл/мин.

• С помощью системы сбора и обработки информации автоматически проводится измерение ширины, расхода рабочего флюида, проницаемости проппантной упаковки и проводимости трещины ГРП при постоянном расходе прокачки рабочего флюида в течение 50 ч.

План проведения экспериментальных исследований. Учитывая пластовые условия участка УС бассейна Ordos, эксперименты проводились при температуре 60 °С и давлениях смыкания 20, 30 и 40 МПа. Исследовались влияния размера гранул, гранулометрического состава, концентрации и способа размещения проппантов, давления смыкания трещины и вдавливания проппантов в стенки трещины на фильтрационные характеристики трещин ГРП. Обсуждались степени разрушения проппантов различного размера гранул под разным давлением. Способы размещения проппантов вдоль трещины показаны на рис. 2в. С учетом работ по ГРП составлен конкретный план проведения экспериментальных исследований влияния разных параметров на проводимость трещин ГРП (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. План проведения экспериментальных исследований

Фактор исследования	Размер гранул песков, меш	Концентрация проппантов, кг/м ²	Гранулометри- ческий состав	Способы размещения проппантов	Давление смыкания трещины, МПа
Влияние размера гранул песков на проводимость	30/50 40/70 70/140	10	Равномерно	— — —	30
Влияние концентрации проппантов	70/140 70/140	5 20	Равномерно	— —	30
Влияние гранулометрического состава	30/50:40/70: 70/140 30/50:40/70: 70/140 30/50:40/70: 70/140	10	1:1:1 1:4:5 1:2:7	Поперечное размещение	30
Влияние способа размещения проппантов	30/50:40/70: 70/140	10	1:2:7	Продольное размещение	30
Влияние давления смыкания трещины	30/50:40/70: 70/140 30/50:40/70: 70/140	10	1:2:7 1:2:7	Оптимальное размещение	20 40
Влияние вдавливания проппантов	30/50:40/70: 70/140	10	1:2:7	Оптимальное размещение (стальные пластины)	30

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены результаты экспериментов по исследованию влияния разных факторов на фильтрационные характеристики трещин ГРП, раздавливание и вдавливание проппантов в стенки трещины в условиях угольного пласта ЕТ участка УС бассейна Ordos.

Влияние размера гранул проппантов на проводимость. На рис. 3а приведены зависимости проводимости трещин с проппантами различных размеров гранул от времени при температуре 60 °С, давлении смыкания 30 МПа и концентрации проппантов 10 кг/м². Проводимости трещин с проппантами различных размеров гранул уменьшаются со временем в разной степени. Первоначальная проводимость трещин с проппантами 30/50, 40/70 и 70/140 меш составляет 27.103, 9.943 и 2.259 Д·см; через 10 ч после начала эксперимента она равна 16.238, 6.715 и 1.719 Д·см соответственно и долговременная проводимость (после 50 ч) — 11.784, 5.608 и 1.696 Д·см.

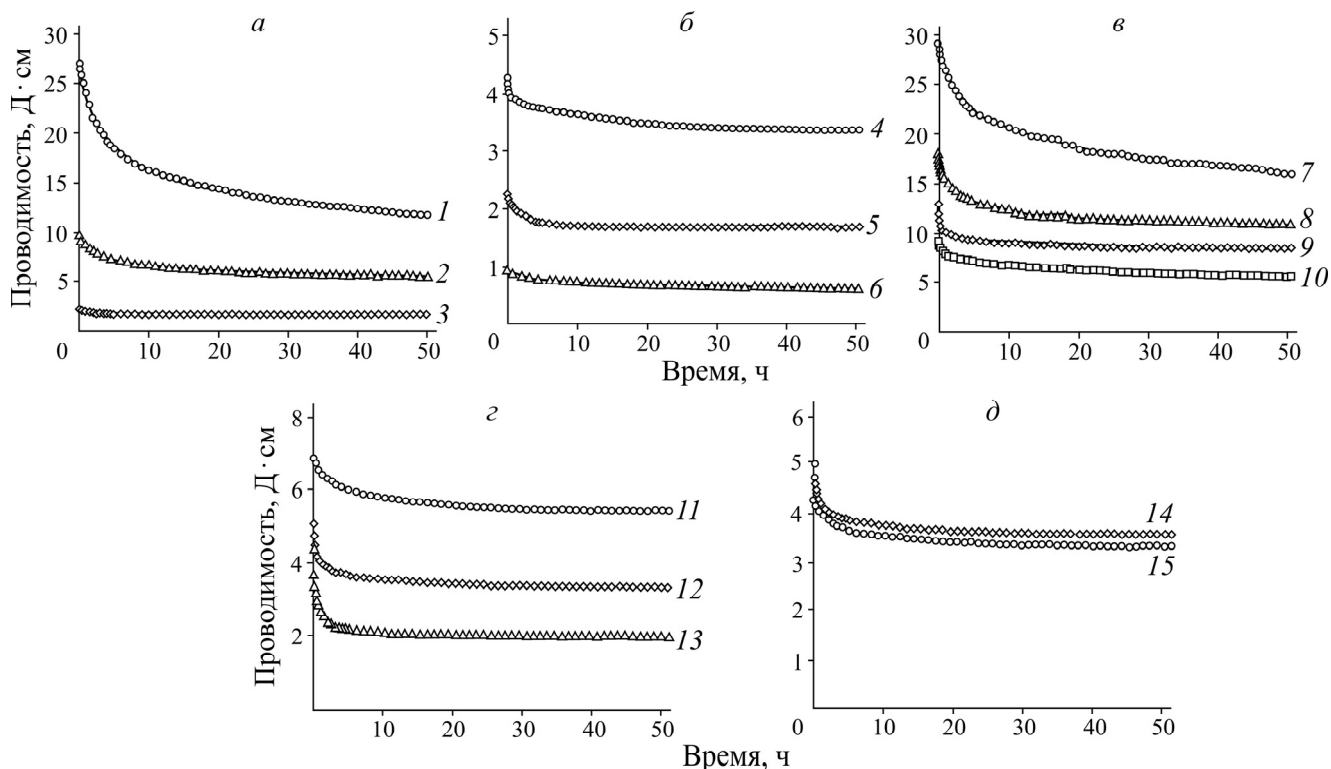


Рис. 3. Зависимость проводимости трещин от разных факторов проппантов и пласта: размера гранул проппантов (а); концентрации проппантов (б); способа размещения проппантов (в); давления смыкания (г); вдавливания проппантов (д): 1 — 30/50 меш (вариант № 1); 2 — 40/50 меш (№ 2); 3 — 70/140 меш (№ 3); 4 — 20 кг/м² (№ 4); 5 — 10 кг/м² (№ 3); 6 — 5 кг/м² (№ 4); 7 — 1:1:1 (№ 6); 8 — 1:4:5 (№ 7); 9 — 1:2:7 (№ 8); 10 — 1:2:7 продольное (№ 9); 11 — 20 МПа (№ 10); 12 — 30 МПа (№ 8); 13 — 40 МПа (№ 11); 14 — пластины керны (№ 8); 15 — стальные пластины (№ 12)

При прочих равных условиях, чем больше размер гранул проппанта, тем больше проводимость. Наибольшая первоначальная проводимость наблюдается у проппанта 30/50 меш, она же в течение эксперимента изменяется в большей степени по сравнению с другими проппантами. Долговременная проводимость трещин с проппантами 30/50, 40/70 и 70/140 меш составляет 43.5, 56.4 и 75.1 % их первоначальной проводимости соответственно. Это свидетельствует о том, что проппант 30/50 меш в ходе испытания претерпевает наибольшее изменение. Тем не менее долговременная проводимость с проппантом 30/50 меш в 9.4 и 2.4 раза больше проводимости с проппантом 40/70 и 70/140 меш соответственно.

Долговременная проводимость трещин с проппантами 30/50, 40/70 и 70/140 меш равна 72.6, 83.5 и 98.7 % их проводимости через 10 ч после начала эксперимента, т. е. проводимость с проппантом 70/140 меш почти стабилизируется. Чем меньше размер гранул проппанта, тем быстрее стабилизируется проводимость. Из рис. 3а также видно, что даже в конце эксперимента проводимость с проппантом 30/50 меш по-прежнему имеет тенденцию к снижению.

Влияние концентрации проппантов на проводимость. Проведено экспериментальное исследование проводимости трещины с песком 70/140 меш концентрацией 5, 10 и 20 кг/м² при давлении смыкания 30 МПа. Результаты показаны на рис. 3б. Концентрация песка напрямую влияет на ширину трещины, что отражается на проводимости. При концентрации 5, 10 и 20 кг/м² первоначальная проводимость составляет 0.932, 2.259 и 4.265 Д·см, через 10 ч после начала эксперимента — 0.727, 1.719 и 3.637 Д·см соответственно, долговременная проводимость — 0.627, 1.696 и 3.374 Д·см.

Проводимость увеличивается с повышением концентрации проппанта, что способствует увеличению объема проппанта и высоты трещины. Результаты исследования показывают, что по сравнению с 5 кг/м^2 первоначальная проводимость при концентрации 10 и 20 кг/м^2 увеличивается в 2.4 и 4.6 раза, долговременная проводимость — в 2.7 и 5.4 раза. Кроме того, долговременная проводимость при концентрации 5, 10 и 20 кг/м^2 составляет 86.2, 98.7 и 92.8 % их проводимости через 10 ч после начала эксперимента, что свидетельствует о способности песка 70/140 меш быстро стабилизировать проводимость.

Влияние гранулометрического состава и способа размещения проппантов на проводимость. Рассмотрим влияние способа размещения проппантов разного гранулометрического состава на проводимость при концентрации 10 кг/м^2 и давлении смыкания 30 МПа. Изучены варианты поперечного размещения проппантов 30/50, 40/70 и 70/140 меш массовым соотношением 1:1:1, 1:4:5 и 1:2:7 (1:2:7 применяется при ГРП на изучаемом участке УС) и продольного размещения массовым соотношением 1:2:7.

Согласно рис. 3в, способ размещения проппантов разного гранулометрического состава играет важную роль в определении степени сохранения проводимости трещин. При наличии небольшого количества (10 %) макрогранулярного проппанта (30/50 меш) проводимость трещины значительно выше, чем при размещении проппанта малого размера гранул (70/140 меш). Проводимость в варианте № 8 (поперечное размещение проппантов 30/50, 40/70 и 70/140 меш массовым соотношением 1:2:7) в 2 раза больше проводимости в варианте № 3 (70/140 меш).

Чем больше массовая доля проппанта малого размера гранул, тем меньше проводимость и тем быстрее она стабилизируется. При поперечном размещении проппантов 30/50, 40/70 и 70/140 меш массовым соотношением 1:1:1 (вариант № 6) наблюдается наибольшая первоначальная и долговременная проводимость — 11.578 и 6.327 Д·см соответственно. По сравнению с вариантом № 6 (массовое соотношение 1:1:1) снижение долговременной проводимости составляет: для варианта № 7 (массовое соотношение 1:4:5) — 31.9 % и для варианта № 8 (массовое соотношение 1:2:7) — 47.0 %. Долговременная проводимость в вариантах № 6, 7 и 8 равна 77.4, 88.8 и 94.2 % их проводимости через 10 ч после начала эксперимента. Даже в конце эксперимента проводимость с массовым соотношением 1:1:1 (вариант № 6) имеет тенденцию к снижению.

Проводимость трещины при поперечном размещении проппанта (вариант № 8) на 49.2 % больше, чем при его продольном размещении (вариант № 9).

Влияние давления смыкания на проводимость. На рис. 3г показано изменение проводимости трещин со временем при разных давлениях смыкания (20, 30 и 40 МПа), размещении проппантов 30/50, 40/70 и 70/140 меш массовым соотношением 1:2:7, температуре 60°C и концентрации проппантов 10 кг/м^2 .

По мере добычи метана уменьшается забойное давление и давление в трещине ГРП, что вызывает повышение эффективного напряжения на проппанты, вследствие чего закрывается существующая трещина, снижается поровое пространство проппантной пачки и проницаемость трещины. Наблюдается падение проводимости трещины в результате повышения напряжения на проппанты. Долговременная проводимость при давлении смыкания 20, 30 и 40 МПа составляет 5.435, 3.352 и 1.997 Д·см. При увеличении давления смыкания с 20 МПа (вариант № 10) до 30 МПа (вариант № 8) и 40 МПа (вариант № 11) снижение долговременной проводимости трещин ГРП составляет 38.3 и 63.3 %. Это свидетельствует о значительном влиянии давления смыкания на проводимость трещины ГРП и о том, что пачка проппанта при большем напряжении претерпевает большее изменение и основная часть частичек проппанта разрушается. Долговременная проводимость связана с давлением смыкания трещин формулой $C_f = 14.8e^{-0.05P_c}$.

Кроме того, чем больше давление смыкания, тем меньше первоначальная проводимость и тем быстрее она стабилизируется. Долговременная проводимость при давлении смыкания 20, 30 и 40 МПа составляет 93.7, 94.2 и 95.2 % проводимости через 10 ч после начала эксперимента соответственно.

Влияние вдавливания проппантов на проводимость. На рис. 3д представлены варианты применения пластин керна (вариант № 8) и стальных пластин (вариант № 12 — отсутствует вдавливание проппантов) при размещении проппантов 30/50, 40/70 и 70/140 меш с массовым соотношением 1:2:7, температуре 60 °С, давлении смыкания 30 МПа и концентрации проппантов 10 кг/м².

Первоначальная проводимость в варианте № 8 сравнивается с проводимостью в варианте № 12. Долговременная проводимость при отсутствии вдавливания проппантов (вариант № 12) увеличивается на 7.1 % по сравнению с вариантом № 8. Из-за процесса вдавливания проппантов в стенки трещины ГРП проводимость медленнее стабилизируется. Долговременная проводимость в вариантах № 8 и 12 составляет 94.2 и 95.0 % их значения через 10 ч после начала эксперимента соответственно. Кроме того, ситуация вдавливания проппантов при разных давлениях смыкания изучена с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа. Результаты показаны на рис. 4, из которого видно углубление вдавливания проппантов в угольную породу с увеличением давления смыкания.

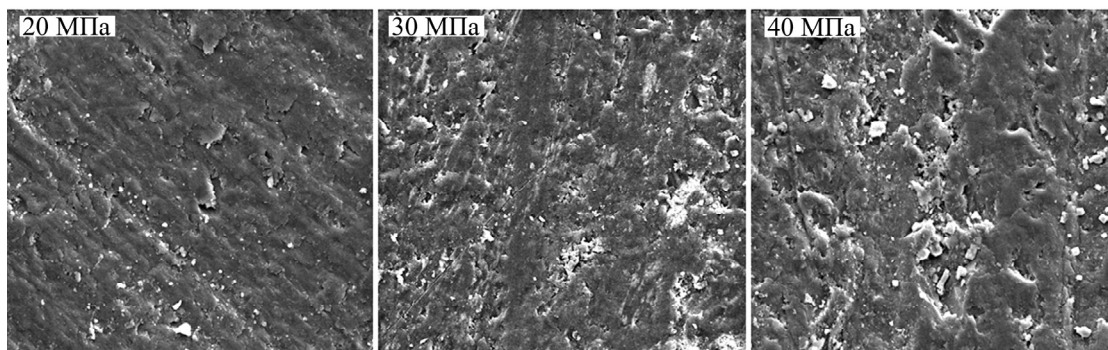


Рис. 4. Вдавливание проппантов при разных давлениях смыкания

Анализ чувствительности проводимости трещины ГРП. Чтобы определить факторы, которые имеют наибольшее влияние на проводимость трещины ГРП, проведен анализ чувствительности долговременной проводимости к параметрам размещения проппантов. Для каждого параметра рассматривается его варьирование в пессимистичном и оптимистичном случае. Степень чувствительности определяется отношением разницы проводимости трещины в пессимистичном и оптимистичном случае к ее максимальному значению.

В табл. 2 приведены виды проводимости при разных вариантах размещения проппантов и результаты анализа чувствительности проводимости. Видно, что при гидроразрыве в угольном пласте ЕТ наибольшей чувствительностью на проводимость трещины обладает размер гранул проппантов, вторую и третью позиции занимают концентрация проппантов и давление смыкания трещины.

Таким образом, в процессе гидроразрыва угольного пласта ЕТ участка УС следует увеличить долю проппанта большого размера гранул, повысить концентрацию песка. Также рекомендуется добыча метана из угольного пласта с поддержанием давления на забое скважины (например, за счет закачки в пласт углекислого газа), чтобы уменьшить чистое напряжение, действующее на проппант.

ТАБЛИЦА 2. Проводимость и результаты анализа чувствительности проводимости

Фактор исследования	Проводимость, Д·см		Чувствительность, %
	первоначальная	долговременная	
Влияние размера гранул песков на проводимость	27.103	11.784	85.6
	9.943	5.608	
	2.259	1.696	
Концентрация проппантов	0.932	0.627	81.4
	4.265	3.374	
Гранулометрический состав	11.578	6.327	63.3
	7.119	4.31	
	5.095	3.352	
Способ размещения проппантов	3.666	2.246	47.0
Давление смыкания трещины	6.879	5.435	33.0
	4.393	1.997	
Вдавливание проппантов	5.136	3.591	6.7

Результаты исследования степени раздавливания проппантов ГРП. Степень раздавливания проппантов определяется массовой долей разрушенных гранул в ходе исследования долговременной проводимости трещин при определенном давлении смыкания. Для визуализации раздавливания проппанта до и после эксперимента используется поляризационный микроскоп Zeiss (Axio Imager 2). Результаты наблюдения проппантов 30/50 меш до и после эксперимента № 8 (температура 60 °С, проппанты 30/50, 40/70 и 70/140 меш массовым соотношением 1:2:7, концентрация 10 кг/м², давление смыкания 30 МПа) приведены на рис. 5, из которого очевидно раздавливание проппантов.

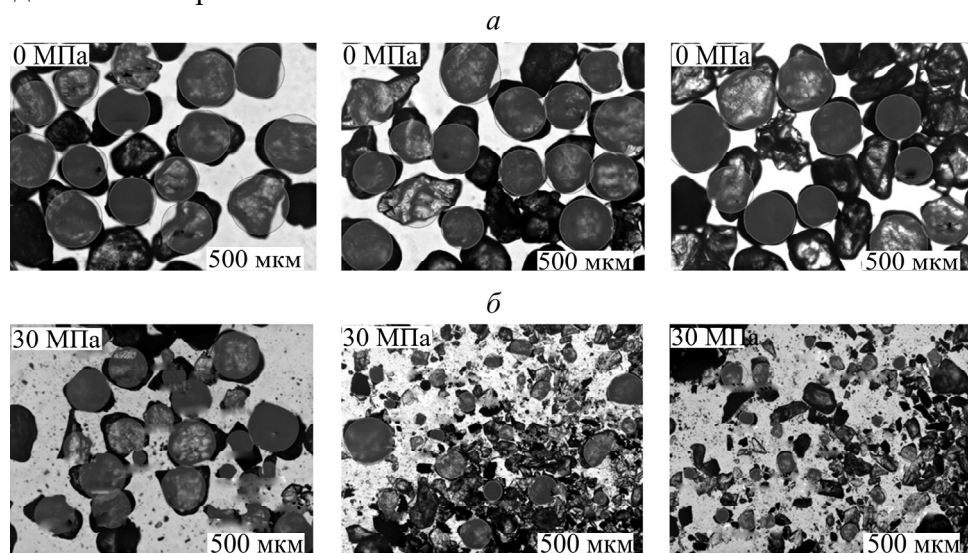


Рис. 5. Результаты наблюдения проппантов 30/50 меш до (а) и после эксперимента № 8 (б)

Для количественного исследования массовой доли гранул основной фракции проппантов до и после действия на них давления смыкания используются весы высокой точности (10⁻⁴ г), ситовой лабораторный вибратор и набор сит, снабженный поддоном (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Выбор набора сит для определения гранулометрического состава проппанта

Номер сита в наборе для отсева фракций		
30 / 50 меш	40 / 70 меш	70 / 140 меш
30	40	60
40	50	70
50	60	80
60	70	90
70	80	100
80	90	120
90	100	140
100	120	160
120	140	180
140	160	200
160	180	Поддон
180	200	
200	Поддон	
Поддон		

На рис. 6 приведены результаты исследования массовой доли гранул основной фракции проппантов 70 / 140 меш до и после эксперимента долговременной проводимости при давлении смыкания 20 МПа (№ 10), 30 МПа (№ 8) и 40 МПа (№ 11). По полученным результатам выявлены следующие закономерности. С увеличением давления смыкания трещины массовая доля проппантов большего размера гранул уменьшается, а проппантов меньшего размера увеличивается, что способствует образованию более плотной упаковки частиц в проппантной пачке и уменьшению проводимости трещины. Для количественной оценки характеристик проппантов вычислены средний размер гранул, диаметр гранул медианный, коэффициент сортировки и степень раздавливания проппантов различного размера до и после действия на них разного давления смыкания (табл. 4).

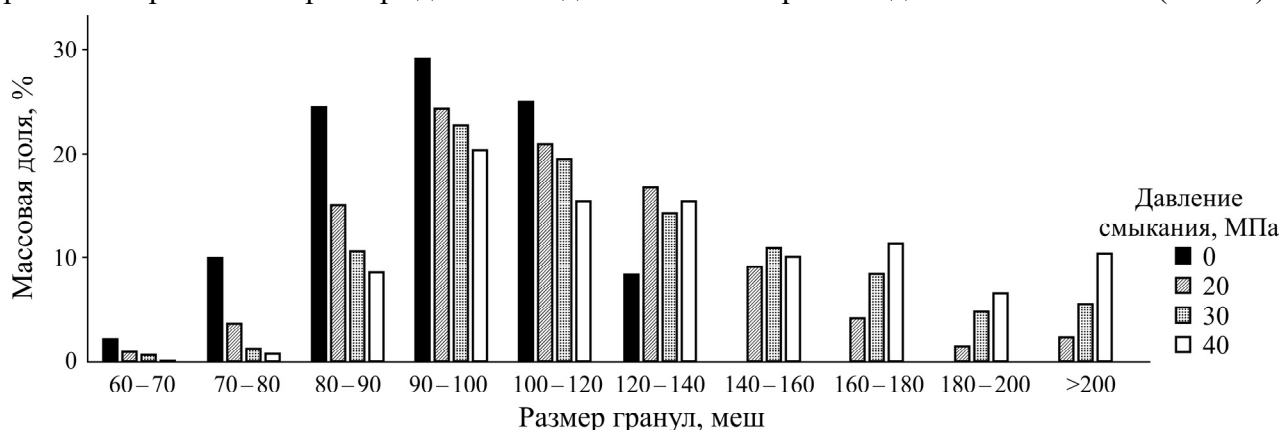


Рис. 6. Результаты ситового анализа массовой доли проппантов 70 / 140 меш

Для проппантов различного размера гранул с увеличением давления смыкания трещины средний размер гранул и диаметр гранул медианный уменьшаются, коэффициент сортировки и степень раздавливания проппанта увеличиваются. Например, при увеличении давления смыкания до 20, 30 и 40 МПа средний размер гранул проппанта 30 / 50 меш уменьшается на 25,0, 32,2 и 36,4 %, диаметр гранул медианный — на 23,9, 31,8 и 37,1 %; коэффициент сортировки увеличивается с 1,41 до 1,57, 1,76 и 1,79 соответственно, т. е. проппант становится менее однородным; степень раздавливания составляет 48,1, 62,1 и 70,3 %.

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчета характеристик проппантов до и после эксперимента по определению проводимости

Размер гранул проппантов, меш	Давление смыкания, МПа	Средний размер гранул, мкм	Диаметр гранул медианный, мкм	Коэффициент сортировки	Степень раздавливания, %
30/50	0	415.8	397.5	1.41	—
	20	312.0	302.5	1.57	48.1
	30	282.0	270.9	1.76	62.1
	40	264.6	250.0	1.79	70.3
40/70	0	293.4	281.6	1.32	—
	20	251.9	257.7	1.41	26.5
	30	221.2	222.1	1.63	43.7
	40	203.6	196.4	1.77	53.3
70/140	0	156.3	155.6	1.23	—
	20	137.2	143.7	1.34	17.0
	30	126.4	132.0	1.53	29.6
	40	117.2	119.8	1.76	38.3

Чтобы оценить влияние раздавливания проппантов на проводимость трещины изучены первоначальная и долговременная проводимость, первоначальная и конечная ширина трещины в экспериментах № 8, 10 и 11 (табл. 5).

ТАБЛИЦА 5. Проводимость и ширина трещин в начале и конце экспериментов

Давление смыкания, МПа	Номер варианта	Проводимость, Д·см			Ширина, мм		
		первоначальная	долговременная	Разность, %	первоначальная	конечная	Разность, %
20	10	6.879	5.435	21.0	5.782	5.633	2.58
30	8	5.095	3.352	34.2	5.769	5.546	3.87
40	11	4.393	1.997	54.5	5.762	5.502	4.51

Из табл. 5 следует, что с увеличением давления смыкания с 20 до 30 и 40 МПа разность между первоначальной и долговременной проводимостью — 21.0, 34.2 и 54.5 %, а разность между первоначальной и конечной шириной трещины составляет всего лишь 2.58, 3.87 и 4.51 %. Падение проводимости в ходе эксперимента значительно превышает падение ширины трещины. Можно сделать вывод, что снижение проводимости обусловлено главным образом снижением проницаемости в результате раздавливания проппантов и закупоривания фильтрационных каналов в проппантной пачке мелкими частицами, образованными при раздавливании. Отсюда следует, что при применении синтетических высококачественных проппантов, например керамических, ожидается существенное повышение долговременной проводимости. Это входит в план дальнейшего исследования, как и анализ влияния полученной проводимости на дебит газовых скважин из угольного пласта ЕТ методом трехмерного численного моделирования.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Выполнено экспериментальное исследование влияния разных факторов на фильтрационные характеристики трещин ГРП, раздавливание и вдавливание проппантов в стенки трещины в условиях угольного пласта ЕТ участка УС бассейна Ordos.

Выявлена положительная корреляция между проводимостью и размером гранул проппантов, их концентрацией. Дана экспоненциальная формула, описывающая зависимость проводимости от давления смыкания трещин, и установлена обратная зависимость между проводимостью и давлением смыкания, вдавливанием проппантов. Чем больше массовая доля проппанта малого размера гранул, тем меньше проводимость и тем быстрее она стабилизируется. В условиях экспериментального исследования факторы располагаются в порядке убывания значимости влияния на проводимость: размер гранул проппантов > концентрация проппантов > давление смыкания трещины > гранулометрический состав > способ размещения проппантов > вдавливание проппантов. В процессе гидроразрыва угольного пласта ЕТ участка УС рекомендуется увеличение доли проппанта большого размера гранул, повышение концентрации песка и добыча метана с поддержанием давления на забое скважины, чтобы уменьшить чистое напряжение, действующее на проппант.

С помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа обнаружено увеличение степени вдавливания проппантов в угольную породу с увеличением давления смыкания. При отсутствии вдавливания проппантов долговременная проводимость увеличивается на 7.1 %.

Раздавливание проппантов и его влияние на проводимость изучено с помощью поляризационного микроскопа и метода ситового анализа. Получена массовая доля гранул основной фракции проппантов до и после действия на них давления смыкания, вычислены средний размер гранул, диаметр гранул медианный, коэффициент сортировки и степень раздавливания проппантов разного размера. Показано, что снижение проводимости обусловлено главным образом снижением проницаемости в результате раздавливания проппантов и закупоривания фильтрационных каналов в проппантной пачке мелкими частицами, образованными при раздавливании. Для повышения долговременной проводимости рекомендуется применение синтетических высококачественных проппантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Awoleke O., Romero J., Zhu D., and Hill A. D. Experimental investigation of propped fracture conductivity in tight gas reservoirs using factorial design, SPE Hydraulic Fracturing Technol. Conf., Texas, USA, February 2012.
2. Lekontsev Y. M., Sazhin P. V., Novik A. V., and Mezentsev Yu. B. Methane production rate in hydraulic fracturing of coal seams, J. Min. Sci., 2021, Vol. 57. — P. 595–600.
3. Ян И., Лян М., Шуайбу А. М. Анализ эффективности проведения гидроразрыва пласта для добычи метана из угольных пластов на участке QD бассейна Qinshui Китая // Нефть. Газ. Новации. — 2019. — № 1. — С. 77–82.
4. Овчинников К. Н., Буянов А. В., Малявко Е. А., Кашапов Д. В. Моделирование распространения маркированного проппанта в трещине гидравлического разрыва пласта // Бурение и Нефть. — 2020. — № 10. — С. 20–27.
5. Serdyukov S. V., Kurlenya M. V., Rybalkin L. A., and Shilova T. V. Hydraulic fracturing effect on filtration resistance in gas drainage hole area in coal, J. Min. Sci., 2019, Vol. 55. — P. 175–184.
6. Zheng W., Silva S. C., and Tannant D. D. Crushing characteristics of four different proppants and implications for fracture conductivity, J. Natural Gas Sci. and Eng., 2018, Vol. 53. — P. 125–138.
7. Isah A., Hiba M., Al-Azani K. H., Aljawad M. S., and Mahmoud M. A comprehensive review of proppant transport in fractured reservoirs: Experimental, numerical, and field aspects, J. Nat. Gas Sci. Eng., 2021, Vol. 88. — 103832.

8. Ян И., Чэнь Х., Ван Х., Чжоу Ц., Цзя Б. Влияние тектонических структур на добычу метана при разработке участка QD угольного бассейна Циньшуй (Китай) // ФТПРПИ. — 2021. — № 3. — С. 85–95.
9. Fan M., Li Z., Han Y., Teng Y., and Chen C. Experimental and numerical investigations of the role of proppant embedment on fracture conductivity in narrow fractures, SPE J., 2020, Vol. 26. — P. 324–341.
10. Shamsi M., Nia S. F., and Jessen K. Dynamic conductivity of proppant-filled fractures, J. Pet. Sci. Eng., 2017, Vol. 151. — P. 183–193.
11. Mourzenko V. V., Thovert J.-F., and Adler P. M. Conductivity and transmissivity of a single fracture, transport in porous media, 2018, Vol. 123. — P. 235–256.
12. Lei G., Liao Q., and Patil S. A new mechanistic model for conductivity of hydraulic fractures with proppants embedment and compaction, J. Hydrology, 2021, Vol. 601. — 126606.
13. Xu J., Ding Y., Yang L., Liu Z., Gao R., Yang H., and Wang Z. Conductivity analysis of tortuous fractures filled with non-spherical proppants, J. Pet. Sci. Eng., 2021, Vol. 198. — 108235.
14. Huang Q., Liu S., Cheng W., and Wang G. Fracture permeability damage and recovery behaviors with fracturing fluid treatment of coal: An experimental study, Fuel, 2020, Vol. 282. — 118809.
15. Yang Z., Chen M., Xu Y., Meng C., and Xu Z. An experimental study of long-term flow conductivity of volcanic rock core plate, Natur. Gas Industry, 2010, Vol. 30. — P. 42–44.
16. Bose C. C., Fairchild B. D., Jones T., Gul A., and Ghahfarokhi R. B. Application of nanopropants for fracture conductivity improvement by reducing fluid loss and packing of micro-fracture, J. Nat. Gas Sci. Eng., 2015, Vol. 27. — P. 424–431.
17. Wilk-Zajdel K., Kasza P., and Maslowski M. Laboratory testing of fracture conductivity damage by foam-based fracturing fluids in low permeability tight gas formations, Energies, 2021, Vol. 14. — 1783.
18. ISO 13503-5. Petroleum and natural gas industries — Completion fluids and materials, Part 5: Procedures for measuring the long-term conductivity of proppants, 2006.
19. National Energy Administration of China. NB/T 14023-2017. Recommended practices for measuring the long-term conductivity of proppant pack in shale, Beijing: Nat. Energy Adm., 2017.
20. ISO 13503-2. Petroleum and natural gas industries — Completion fluids and materials, Part 2: Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations, 2006.
21. China National Petroleum Corporation. Q/SY 17125-2019. Specification and evaluating test procedure for proppants used in hydraulic fracturing, Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.

Поступила в редакцию 12/IV 2023

После доработки 22/VIII 2023

Принята к публикации 15/IX 2023