

На правах рукописи



Шевцов Александр Григорьевич

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ
МНОГОЗАБОЙНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН
ПРИ ДОБЫЧЕ МЕТАНА УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово, 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва» (КузГТУ) и в обществе с ограниченной ответственностью «Газпром добыча Кузнецк».

Научный руководитель	Хмяляйнен Вениамин Анатольевич , доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и геотехнической механики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва»
Официальные оппоненты	Иванов Вадим Васильевич доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник акционерного общества «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ») Патутин Андрей Владимирович кандидат технических наук, старший научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН)
Ведущая организация	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

Защита состоится 02.06.2022 в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.102.02 в КузГТУ по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, тел./факс: +7 (3842) 39-69-60, e-mail: kuzstu@kuzstu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КузГТУ и на сайте организации по адресу:

<https://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2021/she/Dissertation.pdf>.

Автореферат разослан ____ . ____ .2022.

Ученый секретарь
диссертационного совета

М.А. Тюленев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Постепенное истощение запасов традиционных месторождений нефти, газа и газового конденсата уже сейчас вынуждает обратить внимание промышленности на источники углеводородов, которые относятся к категории трудноизвлекаемых. Так, геологическая история формирования месторождений угля по всему миру показывает, что процесс углефикации неразрывно связан с генерацией и аккумуляцией газа. Огромные ресурсы газа в нетронутых угольных пластах и содержание в них метана более 98% позволяют рассматривать его как самостоятельное полезное ископаемое, подходящее для коммерческой добычи.

Промышленная добыча метана угольных пластов (МУП) скважинами с поверхности уже ведется в большинстве стран мира, начиная с 1980-ых годов, покрывая не только потребности регионов в топливе, но и позволяя подготовить угольные месторождения для последующей безопасной отработки угля путем заблаговременной дегазации. Что касается Российской Федерации, в 2010 году на территории Кузнецкого угольного бассейна был запущен первый метанугольный промысел, а уже в 2011 году МУП включен в Общероссийский классификатор полезных ископаемых и подземных вод.

В мировой практике добыча МУП осуществляется в основном вертикальными и наклонно-направленными скважинами, которые не отличаются высокими дебитами. Необходимость в увеличении площади дренирования для достижения более высоких показателей добычи привела метанугольную отрасль к применению горизонтальных скважин с проходкой по угольному пласту, в том числе многозабойных. Тем не менее, получаемые дебиты при реализации различных типов таких скважин значительно разнятся в большинстве источников, что ставит под сомнение экономическую эффективность применяемых технических решений и требует научного обоснования выбора горизонтальных скважин определенной конструкции в имеющихся горно-геологических условиях.

Опубликованные в литературных и нормативных источниках методики выбора конструкций горизонтальных метанугольных скважин не учитывают действующее в массиве горных пород напряженно-деформированное состояние (НДС), которое оказывает значительное влияние на важнейший параметр угольного пласта, определяющий объемы извлечения десорбированного газа – его проницаемость. Таким образом, для формирования обоснования применения в имеющихся горно-геологических условиях определенных типов горизонтальных метанугольных скважин, актуальным является учет действующих в угольном пласте напряжений.

Работа выполнена в соответствии с пунктом 5.1 Перечня приоритетных научно-технических проблем ПАО «Газпром» – Технологии поиска и разведки месторождений углеводородов, включая освоение нетрадиционных ресурсов.

Целью работы является геомеханическое обоснование применения многозабойных горизонтальных скважин при добыче метана угольных пластов, обеспечивающее повышение объемов извлекаемого газа.

Идея работы заключается в комплексном учете конструкции горизонтальной метаноугольной скважины, действующего в массиве горных пород напряженно-деформированного состояния и проницаемости вскрытого скважиной угольного пласта для повышения дебита газа.

Задачи исследования:

– обосновать теоретически влияние геомеханического состояния угольного пласта на его проницаемость вокруг горизонтальных скважин различной конструкции;

– оценить влияние конструкции горизонтальной метаноугольной скважины на геомеханическое состояние и проницаемость угольного пласта в промысловых условиях;

– обосновать и разработать методику выбора конструкции многозабойной горизонтальной метаноугольной скважины.

Методы исследований включают анализ (аналитический обзор литературных, нормативных и патентных источников), дедукцию (определение параметров, обуславливающих дебит газа), синтез (единение параметров, влияющих на дебит горизонтальных метаноугольных скважин) и эмпирические методы исследования (численное моделирование геомеханического состояния массива горных пород, а также анализ данных промысловых экспериментов с использованием классических методов статистической обработки результатов).

Объект исследования: массив горных пород метаноугольного месторождения.

Предмет исследования: НДС массива горных пород в естественных условиях и его изменение во времени в результате строительства и эксплуатации горизонтальных метаноугольных скважин.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. При строительстве многозабойной скважины диаметр боковых стволов имеет ключевое значение и позволяет за счет разгрузки от напряжений повысить проницаемость околоскважинной зоны пласта в направлении максимального главного напряжения на расстояние, равное 10% от принятых диаметров ствола на каждые 100 м глубины залегания пласта на протяжении 2 м после сопряжения стволов и на расстояние 15% от принятых диаметров

ствола на каждые 100 м глубины залегания пласта на всем протяжении боковых отводов.

2. В условиях преобладания горизонтальных напряжений конструкция многозабойной скважины с восходящим профилем позволяет выйти за счет необсаженных боковых отводов в зоны пласта с большей разницей между геостатическим и горизонтальными напряжениями и сократить распространение вглубь пласта зон сжатия, повысив проницаемость за счет дополнительных зон разгрузки на 14% по сравнению с начальной при снижении абсолютной глубины на 70 м.

3. Методика выбора наиболее эффективных в имеющихся горно-геологических условиях конструкций горизонтальных многозабойных метанугольных скважин основана на использовании коэффициента геомеханической эффективности, определяемого как разница между единицей и отношением длины ствола скважины с приуроченными зонами сжатия к общей длине ствола скважины, что позволяет повысить дебит многозабойной скважины более чем в 2 раза.

Научная новизна заключается:

- в теоретической оценке влияния разгрузки от напряжений на повышение проницаемости вокруг горизонтальных метанугольных скважин различной конструкции в зависимости от их диаметра и глубины залегания угольного пласта;

- в промышленной оценке изменения проницаемости угольного пласта за счет формирования зон разуплотнения вокруг боковых стволов многозабойных горизонтальных метанугольных скважин;

- в экспериментальном обосновании влияния коэффициента геомеханической эффективности конструкции скважины при выборе конструкции многозабойной горизонтальной метанугольной скважины на увеличение ее дебита.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается применением для построения геомеханических моделей сертифицированного и лицензированного программного обеспечения, а также использованием реальных промысловых данных, полученных на месторождении метана угольных пластов.

Личный вклад автора состоит в проведении аналитического обзора литературных, нормативных и патентных источников по теме исследования, включая разработки ведущих метанугольных компаний мира, в подготовке численных геомеханических моделей массива горных пород в том числе в специализированном программном обеспечении, обработке и анализе результатов моделирования и подготовке методических рекомендаций по оценке и выбору конструкций многозабойных горизонтальных скважин для добычи метана угольных пластов.

Научное значение заключается в разработке научно обоснованной методики выбора конструкций многозабойных горизонтальных метаноугольных скважин для имеющихся горно-геологических условий, направленной на повышение дебита газа за счет комплексного учета конструкции горизонтальной метаноугольной скважины, напряженно-деформированного состояния массива и проницаемости вскрытого скважиной угольного пласта.

Отличие от ранее выполненных работ заключается в комплексном рассмотрении влияния на дебит горизонтальной метаноугольной скважины ее конструкции, действующего в массиве горных пород НДС и проницаемости вскрытого скважиной угольного пласта.

Практическое значение заключается в разработке методики выбора наиболее эффективных для имеющихся горно-геологических условий мест заложения и конструкций многозабойных горизонтальных метаноугольных скважин.

Реализация работы. Основные научно-практические положения диссертации изложены в методическом документе «Методические рекомендации по выбору мест заложения и конструкций горизонтальных метаноугольных скважин / ООО «Газпром добыча Кузнецк». – Кемерово, 2021. – 13 с», принятом к применению в ООО «Газпром добыча Кузнецк».

Апробация работы. Материалы исследования и его отдельные результаты были представлены на VI, VII и VIII Всероссийских научно-практических конференциях «Россия молодая» (г. Кемерово, 2014-2016); XVI Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс – 2016» (г. Кемерово, 2016); VII международном научно-практическом семинаре РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина «Добыча метана из угольных отложений. Проблемы и перспективы» (г. Москва, 2018); VIII открытой научно-практической конференции молодых специалистов и работников ООО «Газпром добыча Астрахань» «Молодежь и наука: знания, опыт, перспективы» (г. Астрахань, 2019); 73 Международной молодежной научной конференции РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина «Нефть и газ – 2019» (г. Москва, 2019); научно-практических конференциях молодых специалистов и работников ООО «Газпром добыча Кузнецк» «Проблемы извлечения метана из угольных пластов» (г. Кемерово, 2015-2020); IX Молодежной международной научно-практической конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (г. Видное, п. Развилка, 2021).

Публикации. Основные результаты исследования изложены в 16 научных работах, в том числе 4 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, 3 – в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, 6 –

в прочих изданиях, получены 2 патента на изобретения и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы и содержит 123 страницы машинописного текста, включая 56 рисунков, 8 таблиц и 152 библиографические ссылки на работы отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит аналитический обзор современного состояния технологий извлечения МУП скважинами с поверхности.

Мировые ресурсы метана угольных пластов по современным оценкам составляют в среднем порядка 200 трлн м³. Лидерами по данному показателю в порядке убывания являются РФ, КНР, Канада, США и Австралия. В пределах Кузнецкого угольного бассейна РФ при ресурсах метана в 13 трлн м³ в настоящее время ООО «Газпром добыча Кузнецк» реализует совместный инновационный проект Администрации Кемеровской области и ПАО «Газпром» по добыче МУП.

Значительный вклад в развитие теории и практики извлечения метана из угольных пластов в России и за рубежом внесли: Айруни А.Т., Васильев А.Н., Гергерт В.В., Гурьянов В.В., Дрижд Н.А., Зимаков Б.М., Золотых С.С., Иванов В.В., Каркашадзе Г.Г., Козырева Е.Н., Коликов К.С., Малышев Ю.Н., Натура В.Г., Ножкин Н.В., Патугин А.В., Рубан А.Д., Сердюков С.В., Сизиков Д.А., Сластунов С.В., Сторонский Н.М., Тайлаков О.В., Трубецкой К.Н., Хайдина М.П., Хрюкин В.Т., Хямяляйнен В.А., Швачко Е.В., Шишляев В.В., Diamond W., Dugan T., Durucan S., Harpalani S., Mansoori J., McKee C., Oyler D., Palmer I., Seidle J., Schatzel S., Thakur P., Wang X., Yang L. и др.

Добыча метана угольных пластов осуществляется с использованием скважин вертикального, наклонно-направленного и горизонтального профилей. При этом, вертикальные и наклонно-направленные скважины имеют относительно низкую стоимость, но не отличаются высокими дебитами. Для увеличения площади дренирования и достижения более высоких показателей добычи в мировой метанугольной отрасли все чаще применяются горизонтальные скважины с проходкой по угольным пластам.

Среди основных применяемых типов горизонтальных метанугольных скважин с проходкой по угольным пластам выделяются L-образные скважины с гидроразрывом пласта (ГРП), U-образные, V-образные, а также разнообразные конфигурации многозабойных скважин. При этом, в различных горно-геологических условиях скважины указанной конструкции не всегда

достигают проектных дебитов, что, зачастую, ставит под сомнение экономическую эффективность применяемых решений.

Основными критериями применимости горизонтальных метаноугольных скважин являются их конструкция, действующее в угольном пласте НДС и проницаемость вскрытого угольного пласта. Существующие методики оценки применимости горизонтальных скважин для добычи МУП не позволяют в полной мере учесть все три основных критерия, что делает актуальным разработку методики, учитывающей их в комплексе.

По результатам анализа современного состояния изученности вопроса сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена теоретическому обоснованию влияния геомеханического состояния угольного пласта на его проницаемость вокруг горизонтальных скважин различной конструкции.

Исследование НДС месторождений нефти или газа начинается, как правило, с построения одномерных (1D) геомеханических моделей, представляющих собой распределение главных напряжений в массиве горных пород вдоль осей скважин. Основными составляющими 1D геомеханических моделей являются геостатическое напряжение, а также минимальное и максимальное горизонтальные напряжения, которые совместно характеризуют тензор главных нормальных напряжений, действующих на элементарный куб горной породы на определенной глубине по стволу скважины.

Геостатическое напряжение в исследуемой точке характеризует вес вышележащих горных пород и вычисляется путем интегрирования плотности горных пород, слагающих исследуемый массив, по формуле:

$$\sigma_v = g \sum_{i=1}^{i=n} \rho_i h_i, \quad (1)$$

где σ_v – геостатическое напряжение, Па; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; ρ_i – плотность i -го слоя по результатам плотностного каротажа, kg/m^3 ; h_i – мощность i -го слоя (шаг записи плотностного каротажа), м.

Горизонтальные напряжения также учитывают действие тектонических сил и определяются по формулам:

$$\sigma_h = \frac{\nu_{st}}{1 - \nu_{st}} (\sigma_v - \alpha P) + \alpha P + \frac{E_{st}}{1 - \nu_{st}^2} \varepsilon_h + \frac{\nu_{st} E_{st}}{1 - \nu_{st}^2} \varepsilon_H, \quad (2)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu_{st}}{1 - \nu_{st}} (\sigma_v - \alpha P) + \alpha P + \frac{E_{st}}{1 - \nu_{st}^2} \varepsilon_H + \frac{\nu_{st} E_{st}}{1 - \nu_{st}^2} \varepsilon_h, \quad (3)$$

где σ_h и σ_H – минимальное и максимальное горизонтальные напряжения, Па; λ – коэффициент бокового распора; α – коэффициент Био; P – пластовое давление, Па; ν_{st} – статический коэффициент Пуассона; E_{st} – статический модуль Юнга, Па; ε_h и ε_H – деформации в направлении минимального и соответственно максимального горизонтальных напряжений, м.

Матрица угольных пластов сложена плотным метаморфизированным органическим веществом, имеющим низкую межзерновую проницаемость, что делает естественные и искусственные трещины коллектора основным проводящим путем для пластовых флюидов. Эндогенный кливаж образуется в угольных пластах в процессе углефикации, когда летучие вещества покидают угольную матрицу, вызывая уменьшение ее объема. Погружение угольных пластов и тектонические движения в течение геологического времени увеличивают данную сеть трещин. Способность угольных пластов проводить через себя жидкость или газ обусловлена именно первоочередной сетью эндогенных трещин.

Для оценки изменения проницаемости угольного пласта в рамках работы использована формула:

$$\frac{k}{k_0} = e^{-\alpha C_f (\sigma - \sigma_0)}, \quad (4)$$

где k/k_0 – отношение проницаемости угольного пласта при текущем напряжении к начальной проницаемости угольного пласта; α – коэффициент чувствительности угольного пласта к напряжениям (~ 3); C_f – коэффициент сжимаемости угольного пласта ($\sim 0,058 \text{ МПа}^{-1}$); σ – текущее эквивалентное напряжение, действующее на угольный пласт; σ_0 – начальное эквивалентное напряжение (по результатам моделирования начального НДС).

Соответственно при значениях $k/k_0=1$ изменение проницаемости отсутствует, при $k/k_0 < 1$ происходит снижение проницаемости, при $k/k_0 > 1$ образуется зона повышенной проницаемости.

Для исследования влияния конструкции горизонтальной метаногольной скважины на геомеханическое состояние и проницаемость угольного пласта рассмотрены схемы, представленные на рисунке 1 с указанием плоскостей сечения для последующего определения в их пределах НДС.

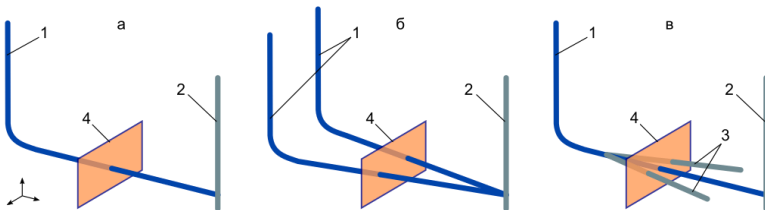


Рисунок 1 – Принятые схемы горизонтальных скважин: а – U-образная, б – V-образная, в – многозабойная, 1 – горизонтальная скважина, 2 – вертикальная скважина, 3 – боковые стволы, 4 – плоскости сечения

Для указанных схем выполнено двухмерное геомеханическое моделирование методом конечных элементов. Адекватность полученных результа-

тов оценена по проведенному *in situ* в близлежащей скважине № 1 мини-ГРП, давление закрытия трещины пласта 73-72 в которой соответствует значению минимального горизонтального напряжения в скважине № 10.

Чтобы количественно сравнить НДС в разных точках модели, когда в каждой точке рассчитано шесть компонент, необходимо представить напряженное состояние в конкретной точке одной скалярной величиной (скалярным эквивалентом тензора). Напряжение фон Мизеса является такой величиной и вычисляется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}, \quad (5)$$

где σ – эквивалентное напряжение фон Мизеса, Па; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные нормальные напряжения, действующие в рассматриваемой точке, Па.

На рисунке 2 представлена картина распределения напряжений и проницаемости в угольном пласте на глубине 700 м с одиночной U-образной горизонтальной скважиной диаметром 76 и 114 мм соответственно.

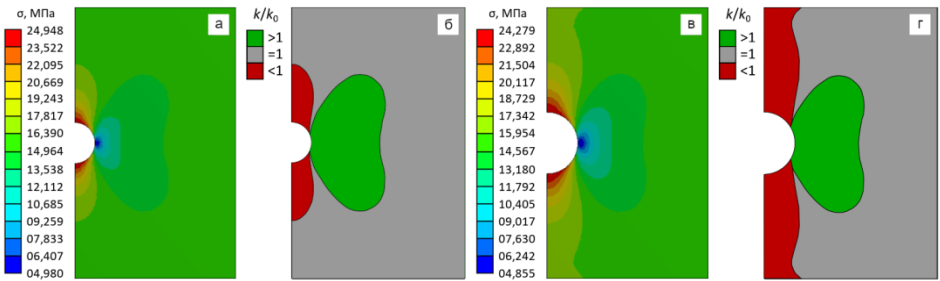


Рисунок 2 – Распределение эквивалентного напряжения и отношения текущей проницаемости угольного пласта к начальной вокруг U-образной горизонтальной метанугольной скважины диаметром 76 мм (а, б) и 114 мм (в, г)

В направлении от стенки скважины по оси вертикального напряжения в обоих случаях формируется зона сжатия, снижающая проницаемость и увеличивающаяся при увеличении диаметра ствола. По горизонтали вглубь пласта формируется обширная область разгрузки и увеличения проницаемости. Размер области разгрузки не зависит от диаметра скважины.

В зависимости от глубины, картины изолиний неизменны, меняется только величина эквивалентных напряжений, соответствующих изолиниям. Для детальной оценки изменения проницаемости после строительства горизонтальных скважин, по линиям наименьшего напряжения построены графики отношения k/k_0 для рассматриваемых глубин залегания пласта и диаметров стволов. На рисунке 3 представлены указанные графики для U-образной скважины.

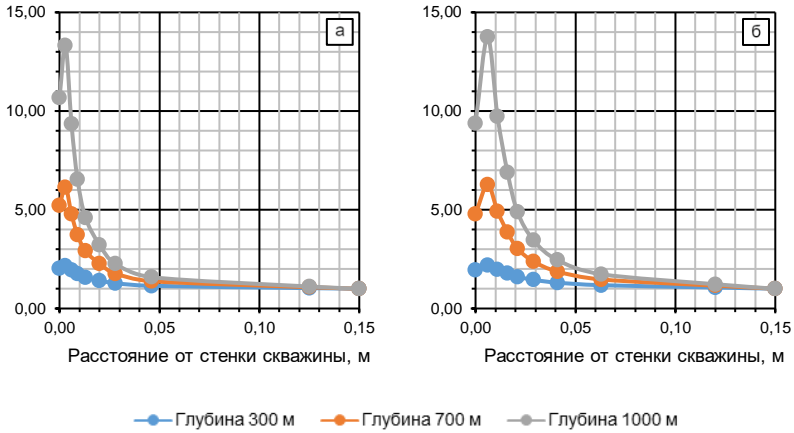


Рисунок 3 – Графики изменения отношения текущей проницаемости угольного пласта к начальной k/k_0 после строительства U-образной горизонтальной скважины с диаметром ствола 76 мм (а) и 114 мм (б)

Результаты для V-образной скважины показали аналогичные результаты. Распределение для многозабойной скважины представлено на рисунке 4.

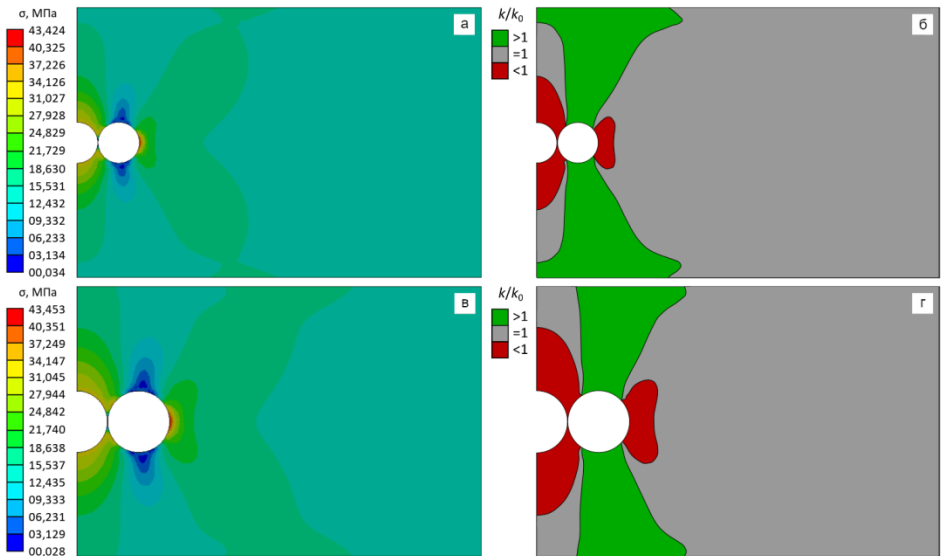


Рисунок 4 – Распределение эквивалентного напряжения и отношения текущей проницаемости угольного пласта к начальной вокруг многозабойной скважины диаметром 76 мм (а, б) и 114 мм (в, г) в сопряжении

На рисунке 5 представлено изменение проницаемости от глубины и диаметра стволов в направлении минимального сопротивления.

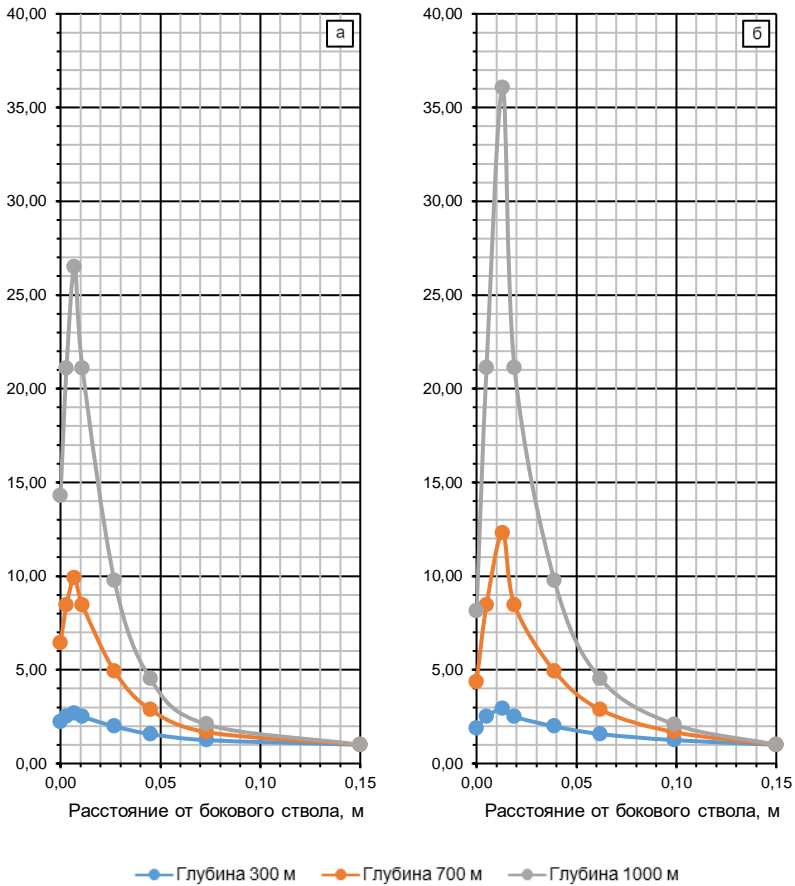


Рисунок 5 – Графики изменения отношения текущей проницаемости к начальной k/k_0 после строительства многозабойной скважины с диаметром бокового ствола 76 мм (а) и 114 мм (б) в плоскости сопряжения стволов

Интенсивное увеличение проницаемости ($k/k_0 \geq 2$) наблюдается на расстоянии, соизмеримом с диаметром ствола в соотношении $0,05D$ (5% от диаметра) на каждые 100 м глубины залегания пласта для U-образной и V-образной скважин. В случае сопряжения многозабойной скважины наблюдается на расстоянии $\sim 0,1D$ (10% от диаметра ствола) на каждые 100 м залегания пласта, а в случае через 2 м от сопряжения уже $0,15D$ (15% от диаметра ствола) на каждые 100 м глубины пласта.

Полученные результаты позволили сформулировать первое научное положение.

В третьей главе проведена промысловая оценка влияния конструкции горизонтальной метанугольной скважины на геомеханическое состояние и проницаемость угольного пласта.

Промысловая оценка влияния конструкции горизонтальной скважины на НДС и проницаемость угольного пласта в рамках данной работы выполнялась на Нарыкско-Осташкинском метанугольном месторождении Кузбасса. В качестве объекта работ выбран мощный угольный пласт 73-72, на котором была пробурена первая в Российской Федерации горизонтальная метанугольная скважина № 11, имеющая U-образную конструкцию. Данная скважина принята в данной работе в качестве базового варианта, позволяя выполнить обоснованный сравнительный анализ с экспериментальной многозабойной метанугольной скважиной № 332, пробуренной также в пределах указанного угольного пласта.

Первичная оценка кернового материала позволила сделать вывод о том, что на всем месторождении в угольном пласте 73-72 прогнозируется развитая эндогенная трещиноватость и, соответственно, высокая (по меркам нетрадиционного коллектора) проницаемость. Для количественного определения фильтрационных параметров угольных пластов использованы результаты гидродинамических исследований (ГДИС), представленные на рисунке 6.

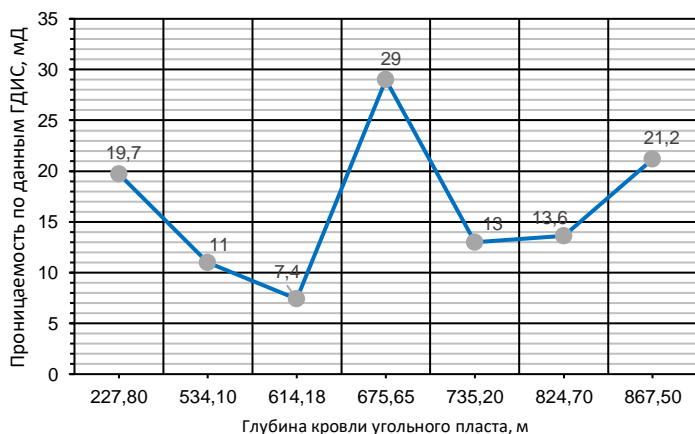


Рисунок 6 – Распределение проницаемости (ГДИС) угольного пласта 73-72 по глубине

Как видно из графика, до глубины ~600 м проницаемость снижается с глубиной, на глубине 675 м является максимальной, а с дальнейшим увеличением глубины залегания пласта наблюдается увеличение проницаемо-

сти. Минеральный и петрографический состав пласта по месторождению изменяются незначительно, в связи с чем, в условиях возрастания глубин залегания пласта, такое изменение проницаемости в скважинах свидетельствует о влиянии действующих в массиве напряжений.

На системе скважин № 10 и № 11 была апробирована технология дополнительного воздействия в вертикальной скважине путем проведения ГРП. Для оценки влияния искусственных трещин на НДС пласта выполнено численное геомеханическое моделирование горизонтальной трещины ГРП раскрытием 0,1 м и длиной 10 м и 30 м. Полученные результаты оценки изменения проницаемости приведены на рисунке 7 в виде рассчитанных по формуле (4) областей разгрузки.

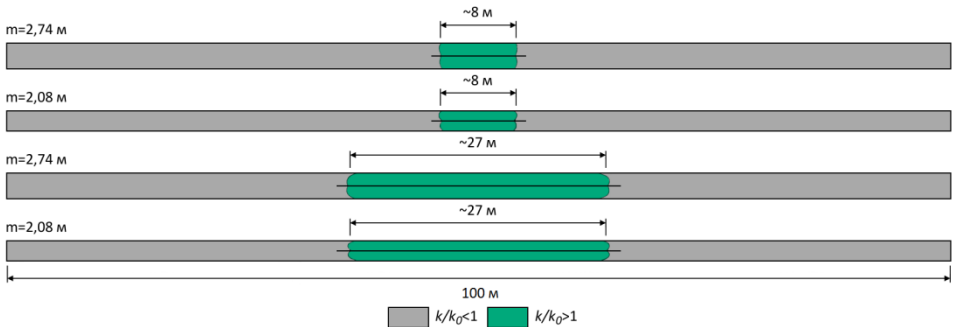


Рисунок 7 – Оценка изменения проницаемости вокруг трещин ГРП

Увеличение проницаемости наблюдается по всей мощности целевых угольных пластов вдоль простирания трещины ГРП, за исключением концов трещин, являющихся концентраторами напряжений. Для оценки проницаемости трещин до и после их закрепления, была разработана и запатентована лабораторная установка, моделирующая трещиноватый горный массив, а также разработана программа для ЭВМ, позволяющая ускорить проведение расчетов. На данной установке был проведен ряд экспериментов, позволивших определить, что материалом, наиболее эффективным для закрепления трещин ГРП в угольных пластах, является природный кварцевый песок после обогащения и выделения определенных фракций, подбирающихся под условия залегания угольного пласта

Для определения главных компонент тензора напряжений в угольном пласте 73-72 в местах его вскрытия горизонтальными скважинами № 11 и № 332, использованы данные исследований в первоочередных вертикальных скважинах № 10 и № 31. Данные скважины являются опорными и позволяют получить наиболее полную информацию о целевом пласте, т. к. бурятся первыми в системе. В таблице 1 представлены средние значения

напряжений, принятые для дальнейшего геомеханического моделирования в промысловых условиях.

Таблица 1 – Средние значения главных напряжений, действующих в угольном пласте 73-72 в местах вскрытия скважинами № 10 и № 31

№ сква- жины	Параметр	Ед. изм.	Значение
10	Геостатическое напряжение σ_v	МПа	19,137
	Минимальное горизонтальное напряжение σ_h	МПа	15,917
	Максимальное горизонтальное напряжение σ_H	МПа	16,783
31	Геостатическое напряжение σ_v	МПа	12,752
	Минимальное горизонтальное напряжение σ_h	МПа	12,528
	Максимальное горизонтальное напряжение σ_H	МПа	13,341

Для определения изменения главных напряжений, полученные компоненты тензора были спроецированы на пробуренные горизонтальные стволы, а именно – произведена интерполяция главных нормальных напряжений на траектории скважин (изменение абсолютной глубины в каждой точке).

Для определения наиболее вероятного направления распространения главных эндогенных трещин восстановлена хронология формирования угольных пластов Кузбасса. Так, направление максимального главного напряжения совпадает с направлением разрывных нарушений в масштабе месторождения.

По аналогии с вариантами горизонтальных метанугольных скважин во второй главе, для пробуренных скважин № 11 и № 332 выполнено двухмерное геомеханическое моделирование по полученным промысловым данным. На рисунке 8 представлены результаты проведенного геомеханического моделирования и оценки проницаемости для двух рассмотренных сечений – в точке входа в пласт и, фактически, на забое скважины № 11.

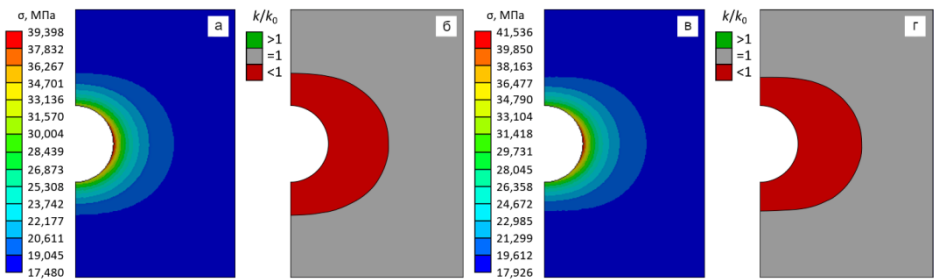


Рисунок 8 – Распределение эквивалентного напряжения и отношения текущей проницаемости угольного пласта 73-72 к начальной вокруг U-образной скважины № 11 через 10 м после входа в пласт (а, б) и через 470 м (в, г)

Во всех сечениях основных стволов отсутствуют зоны разгрузки и участки пласта в окрестности обсадной колонны испытывают значительное уплотнение. Восстающий ствол многозабойной скважины позволил снизить сжатие на забое за счет перераспределения напряжений и смещения зоны уплотнения вдоль плоскости напластования, сократив ее размер с 6 см до 1,75 см по вертикальной оси. При этом, уплотнение по горизонтальной оси растянулось на расстояние, практически равное двум диаметрам ствола.

В случае необсаженных стволов наблюдается изменение преимущественного направления зоны сжатия на вертикальную ось. Приращения в абсолютных глубинах бокового ствола № 1 недостаточно для изменения картины напряженного состояния, в случае же ствола № 3 на забое наблюдается снижение влияния зоны сжатия и появления небольшой зоны разуплотнения на расстоянии одного диаметра ствола. Появление зон разуплотнения на забое также фиксируется и на других восходящих боковых стволах (рисунок 9), при этом в точках зарезки стволов данные зоны не наблюдаются.

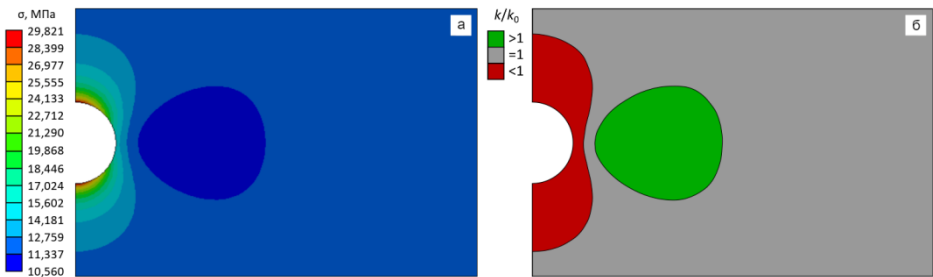


Рисунок 9 – Распределение эквивалентного напряжения (а) и отношения текущей проницаемости угольного пласта 73-72 к начальной k/k_0 (б) вокруг многозабойной скважины № 332 через 360 м бокового ствола № 5

В случае пятого ствола наблюдается наибольшая область разуплотнения по наибольшей оси, распространенная вглубь пласта на расстояние порядка 80% от диаметра ствола. В случае бокового ствола № 5 за счет снижения абсолютной глубины (истинной вертикальной) на 70 м проницаемость увеличилась на 14%, а зона уплотнения уменьшилась практически вдвое.

Полученные результаты подтверждают, что даже в условиях горизонтального сжатия многозабойная скважина показывает свою эффективность, но уже при соблюдении некоторых условий – восходящего профиля и ухода в зоны наибольшего различия главных напряжений. Одноствольные скважины в условиях преобладания горизонтальных напряжений неэффективны и, в случае их применения, требуют дополнительного воздействия, например, проведения в них операций ГРП.

На основании полученных результатов сформулировано второе научное положение.

В четвертой главе предложена и обоснована методика выбора конструкции многозабойной горизонтальной метанугольной скважины.

Учитывая, что наиболее значимыми достоинствами многозабойных скважин являются их большая площадь дренирования и увеличенный контакт с угольным пластом, целесообразно в качестве параметра эффективности использовать объем «полезной» проходки, не снижающей проницаемость пласта. На рисунке 10 представлены результаты такого анализа по скважинам № 11 и № 332.

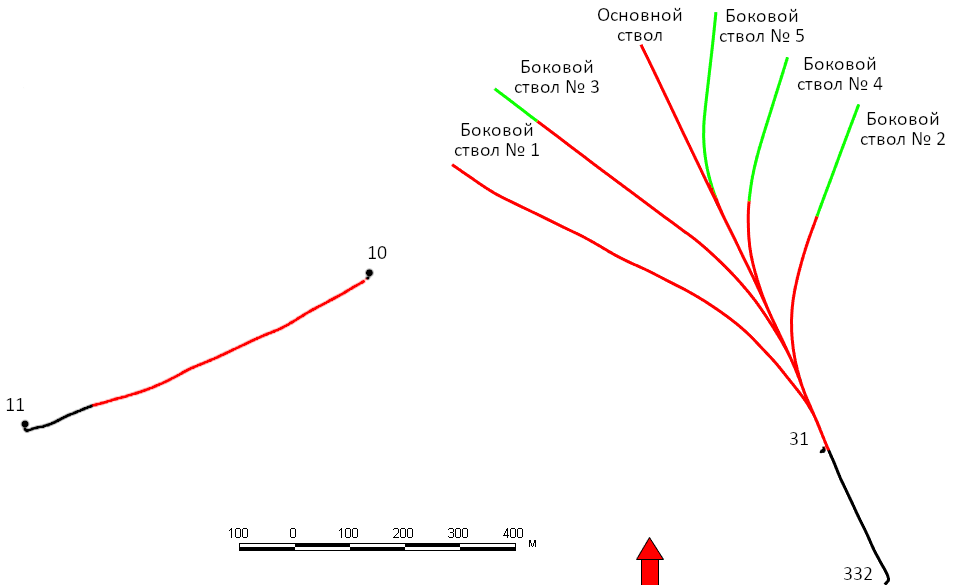


Рисунок 10 – Результаты анализа эффективности горизонтальной проходки скважин № 11 и № 332: красным обозначены зоны преобладания сжатия, зеленым – разуплотнения

Вывод об эффективности конструкции горизонтальной скважины предложено выполнять в соответствии с формулой (6):

$$r = 1 - \frac{L_s}{L_o}, \quad (6)$$

где r – коэффициент геомеханической эффективности конструкции горизонтальной метанугольной скважины; L_s – проходка скважины в угольном пласте с приуроченными зонами сжатия ($k/k_0 < 1$), м; L_o – общая проходка скважины в угольном пласте, м.

Рассчитаны коэффициенты геомеханической эффективности для исследуемых конструкций скважин:

$$r_{11} = 1 - (483/483) = 0;$$

$$r_{332} = 1 - (2\ 733/3\ 733) = 0,27.$$

Таким образом, в отличие от сжатого ствола скважины № 11, 27% скважины № 332 разгружены от напряжений. Для комплексного анализа рассмотрим результаты начальных этапов освоения исследуемых скважин и сделаем вывод об их эффективности на основе полученных дебитов газа. Так, пиковый среднесуточный дебит скважины № 11 на начальном этапе освоения составил 322 м³/сут., а скважины № 332 более чем в два раза выше, 694 м³/сут., что подтверждает большую эффективность многозабойной метаноугольной скважины.

В таблице 2 представлены результаты оценки предложенного технического решения по многозабойной скважине и базового варианта – одиночной горизонтальной скважины.

Таблица 1 – Результаты оценки технической эффективности конструкции многозабойной горизонтальной скважины

Параметр	Значение	
	Базовый вариант	Предлагаемый вариант
Глубина залегания продуктивного угольного пласта, м	739,5-805,5	405,0-541,3
Эффективная мощность продуктивного угольного пласта, м	5	
Коэффициент проницаемости продуктивного угольного пласта, м ²	4·10 ⁻¹⁵	0,01·10 ⁻¹⁵
Количество дополнительных интервалов гидроразрыва в вертикальной скважине, шт.	3	0
Количество необсаженных боковых стволов, шт.	0	5
Диаметр горизонтальных стволов (диаметр долота), м	142,9·10 ⁻³	152,4·10 ⁻³
Суммарная проходка по продуктивному угольному пласту, м	483	3 733
Минимальное начальное эквивалентное напряжение, Па	17,585·10 ⁶	11,337·10 ⁶
Минимальное эквивалентное напряжение после строительства скважины, Па	17,480·10 ⁶	10,560·10 ⁶
Увеличение проницаемости в зонах разгрузки прискважинной зоны пласта, %	0	14
Коэффициент геомеханической эффективности конструкции скважины	0	0,27
Среднесуточный дебит газа на начальных этапах освоения, м ³ /сут.	322	694

На основе результатов выполненных исследований разработана методика выбора мест заложения и наиболее эффективных в имеющихся горно-геологических условиях конструкций горизонтальных многозабойных скважин для добычи метана угольных пластов. Разработанная методика позволяет повысить дебит многозабойной скважины более чем в два раза по сравнению с одиночной горизонтальной скважиной за счет учета конструкции, геомеханического состояния и проницаемости угольного пласта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по геомеханическому обоснованию применения многозабойных горизонтальных скважин при добыче метана угольных пластов, включающей в себя теоретическое обоснование влияния геомеханического состояния угольного пласта на его проницаемость вокруг горизонтальных скважин различной конструкции, промысловую оценку влияния конструкции горизонтальной скважины на геомеханическое состояние и проницаемость угольного пласта, а также обоснование и разработку методики выбора конструкции многозабойной горизонтальной метаноугольной скважины, что имеет важное значение для добычи метана угольных пластов.

Основные научные и практические результаты и рекомендации заключаются в следующем.

1. Определены зависимости расстояния распространения зон разгрузки горизонтальных метаноугольных скважин от глубины угольного пласта. Так, при строительстве многозабойной скважины диаметр боковых стволов имеет ключевое значение и позволяет за счет разгрузки от напряжений повысить проницаемость околоскважинной зоны пласта в направлении максимального главного напряжения на расстояние, равное 10% от принятых диаметров ствола на каждые 100 м глубины залегания пласта на протяжении 2 м после сопряжения стволов и на расстояние 15% от принятых диаметров ствола на каждые 100 м глубины залегания пласта на всем протяжении боковых отводов.

2. Промысловая оценка изменения проницаемости угольного пласта за счет формирования зон разуплотнения вокруг боковых стволов многозабойных горизонтальных метаноугольных скважин показала, что в условиях преобладания горизонтальных напряжений конструкция многозабойной скважины с восходящим профилем позволяет выйти за счет необсаженных боковых отводов в зоны пласта с большей разницей между геостатическим и горизонтальными напряжениями и сократить распространение вглубь пласта зон сжатия, повысив проницаемость за счет дополнительных зон раз-

грузки на 14% по сравнению с начальной при снижении абсолютной глубины на 70 м.

3. Подготовлена и обоснована методика, позволяющая определить геомеханическую эффективность конструкций горизонтальных многозабойных метаноугольных скважин для увеличения их дебита. Так, использование при выборе наиболее эффективных в имеющихся горно-геологических условиях конструкций горизонтальных многозабойных метаноугольных скважин коэффициента геомеханической эффективности, определяемого как разница между единицей и отношением длины ствола скважины с приуроченными зонами сжатия к общей длине ствола скважины, позволяет повысить дебит многозабойной скважины более чем в 2 раза по сравнению с одиночной горизонтальной скважиной.

Полученные результаты легли в основу разработанных методических рекомендаций по выбору мест заложения и конструкций горизонтальных метаноугольных скважин, принятых к использованию в ООО «Газпром добыча Кузнецк». Также полученные результаты возможно использовать при проектировании дегазационных работ на угольных шахтах с учетом ряда особенностей, что является перспективным направлением дальнейших исследований.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих печатных работах.

В изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Хмяляйнен, В.А. О влиянии напряженно-деформированного состояния угольного пласта на проницаемость закрепленной трещины гидроразрыва / В.А. Хмяляйнен, М.А. Баёв, **А.Г. Шевцов** // Вестник КузГТУ. – 2017. – № 6. – С. 121–126.

2. **Шевцов, А.Г.** Подготовка одномерных геомеханических моделей метаноугольных месторождений по данным исследований в структурных и разведочных скважинах / **А.Г. Шевцов** // Наука и техника в газовой промышленности. – 2018. – № 4. – С. 17–21.

3. **Шевцов, А.Г.** Геомеханическая оценка влияния трещины гидроразрыва на проницаемость угольного пласта в условиях Кузбасса / **А.Г. Шевцов**, В.А. Хмяляйнен // Вестник КузГТУ. – 2018. – № 6. – С. 15–19.

4. Штоль, А.В. Первый опыт строительства многозабойной скважины с большим отклонением забоя от вертикали в условиях метаноугольного месторождения Кузбасса / А.В. Штоль, О.Г. Мязин, Е.О. Казаков, **А.Г. Шевцов**, Е.В. Кудинов, А.В. Попов // Газовая промышленность. – 2021. – Спецвыпуск № 1. – С. 64–67.

В изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования:

5. Baev, M. Stimulation of the Methane Production with the Use of Changing of the Rock Massif Physical Conditions / M. Baev, V. Khyamyalyaynen, **A. Shevtsov** // The Second International Innovative Mining Symposium. – Kemerovo: EDP Sciences, 2017.

6. Baev, M. Geomechanical Assessment of the Effect Inhomogeneities on the Propagation Hydrofractures in Coal Seams / M. Baev, V. Khyamyalyaynen, **A. Shevtsov** // The Fourth International Innovative Mining Symposium. – Kemerovo: EDP Sciences, 2019.

7. **Shevtsov, A.** Geomechanical Estimation of the Influence of Horizontal Coalbed Methane Well Design on Coal Seam Permeability / **A. Shevtsov**, V. Khyamyalyaynen // The Fourth International Innovative Mining Symposium. – Kemerovo: EDP Sciences, 2019.

В прочих изданиях:

8. Баёв, М.А. О некоторых проблемах технологии добычи метана из угольных пластов и возможных путях их решения / М.А. Баёв, А.П. Коровицын, **А.Г. Шевцов**, В.А. Хямяляйнен // Сб. тр. XIV Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». – Кемерово, 2012. – С. 124-126.

9. Баёв, М.А. Методика исследования проницаемости закрепленной трещины разрыва угольного пласта / М.А. Баёв, **А.Г. Шевцов** // Сб. материалов VI Всерос. научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая». – Кемерово, 2014.

10. Баёв, М.А. О первых результатах оценки применимости песков Кемеровской области для закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов / М.А. Баёв, **А.Г. Шевцов** // Сб. материалов VII Всерос. научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая». – Кемерово, 2015.

11. Баёв, М.А. Применение компьютерных программ для лабораторных исследований физических процессов добычи метана из угольных пластов / М.А. Баёв, **А.Г. Шевцов** // Сб. материалов VIII Всерос. научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая». – Кемерово, 2016.

12. **Шевцов, А.Г.** Роль геомеханического моделирования массива горных пород при добыче метана из угольных пластов / **А.Г. Шевцов**, М.А. Баёв, В.А. Хямяляйнен // Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2016». – Кемерово, 2016.

13. **Шевцов, А.Г.** Анализ критериев применимости горизонтальных скважин для добычи метана из угольных пластов / **А.Г. Шевцов** // Сб. материалов XI Всерос. научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая». – Кемерово, 2019.

Объекты интеллектуальной собственности:

14. Патент № 2540717 Российская Федерация, МПК E21C 39/00 (2006.01). Модель трещиноватого горного массива: № 2013143434/03: заявл. 25.09.2013: опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4 / Хмяляйнен В.А., Баёв М.А., Коровицын А.П., **Шевцов А.Г.**; заявитель и патентообладатель КузГТУ. – 5 с.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610243 Российская Федерация. Расчет проницаемости трещины: № 2015660734: заявл. 09.11.2015: опубл. 20.02.2016 / Баёв М.А., **Шевцов А.Г.**; заявитель и правообладатель КузГТУ. – 1 с.

16. Патент № 2720859 Российская Федерация, МПК E21B 47/00 (2012.01). Способ выбора конструкции горизонтальной метаноугольной скважины: № 2019116561: заявл. 29.05.2019: опубл. 13.05.2020, Бюл. № 14 / **Шевцов А.Г.**, Альмухаметов А.В., Кудинов Е.В., Коровицын А.П.; заявитель и патентообладатель ООО «Газпром добыча Кузнецк». – 9 с.

Подписано к печати 23.03.2022

Формат 60×84/16. Гарнитура «Times New Roman».
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,28.

Тираж 100 экз. Заказ № 2303/22.

Отпечатано в типографии ООО «ВВС-А».
650000, г. Кемерово, ул. Д. Бедного, 1, оф. 423.