

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.237.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ  
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 23.03.2023 г. № 6

О присуждении Лапину Василию Николаевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование распространения трещин, нагруженных давлением вязкой жидкости» по специальности 1.2.2 – «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 08.12.2022 (протокол заседания №9/пз) диссертационным советом 24.1.237.01, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», 125047, г. Москва, Миусская пл., д.4. Диссертационный совет утвержден приказом Минобрнауки России №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель Лапин Василий Николаевич, 1978 года рождения, в 2000 г. окончил механико-математический факультет Новосибирского государственного университета (в настоящее время Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет») с присуждением квалификации математик. В том же году поступил в аспирантуру Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук (в настоящее время Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

«Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий»), которую окончил в 2003 году.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Численное моделирование течений несжимаемой жидкости в аэрогидродинамических установках» защитил в 2006 году, в диссертационном совете Д 003.046.01, созданном на базе Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук. В настоящее время соискатель работает в должности старшего научного сотрудника в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий».

**Научный консультант – Черный Сергей Григорьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

**Официальные оппоненты:**

**Смирнов Николай Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией волновых процессов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,

**Татосов Алексей Викторович**, доктор физико-математических наук, доцент (уч. зв.), профессор кафедры фундаментальной математики и механики Института математики и компьютерных наук, Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет»,

**Осипцов Андрей Александрович, доктор физико-математических наук,** директор Проектного центра по энергопереходу Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН) в своем **положительном отзыве,** подписанном **Головиным Сергеем Валерьевичем,** д.ф.-м.н., профессором РАН, заведующим лаборатории цифровых и интеллектуальных систем добычи углеводородов указала, что диссертация Лапина В.Н. «Моделирование распространения трещин, нагруженных давлением вязкой жидкости» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложен комплекс результатов, дающих решение крупной научно-технической проблемы анализа распространения трещин и имеющих большое значение для развития таких отраслей науки как механика трещин, горное дело и методы вычислений. Диссертационное исследование обладает научной и практической значимостью, в частности результаты, касающаяся нового алгоритма решения связанных задач трехмерной модели трещины гидроразрыва, могут быть использованы для широкого круга задач, включающих нелинейные дифференциальные уравнения в областях с движущимися границами; предложенный и валидированный критерий распространения трещины может применяться для описания трещин различных видов, не ограничиваясь трещинами гидроразрыва пласта в условиях сложного нагружения; выявление области применимости модели несжимаемой ньютоновской жидкости при описании движения жидкости в узком канале переменного сечения позволяет повысить эффективность численного описания процесса за счет использования более простых моделей.

Основные результаты диссертации прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях, научных семинарах, в должной мере отражены в научных публикациях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России и международные наукометрические базы. Содержание работы соответствует паспорту специальности 1.2.2 - «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Автореферат отражает содержание диссертации. Диссертационная работа «Моделирование распространения трещин, нагруженных давлением вязкой жидкости» удовлетворяет требованиям п.п. 9, 10, «Положения о порядке ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор Лапин Василий Николаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 - «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Соискатель имеет 90 опубликованных работ (включая тезисы конференций), в том числе по теме диссертации опубликовано 18 работ, из них в рецензируемых научных изданиях – 17 работ. 13 из 17 вышеуказанных публикаций были опубликованы в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и/или Web of Science. 11 из перечисленных выше – в изданиях из перечня ВАК. Опубликовано 1 монография. На разработанную программу получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Диссертация не содержит некорректных заимствований.

#### **Основные научные работы соискателя по теме диссертации:**

1. Лапин В.Н. Модель распространения трещины вдоль гидроизоляции скважины // Вестник НГУ. Серия: Инф. тех. – 2020. – Т.18. № 1. – С.36-49.

2. Lapin V.N., Esipov D.V. Simulation of proppant transport and fracture plugging in the framework of a radial hydraulic fracturing model // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2020. – Vol. 35, No 6. – P. 325-339 (Scopus)
3. Лапин В.Н., Фомина А.А. Валидация неявного критерия выбора направления распространения трещины при смешанной нагрузке // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2019. – Т. 22 №4. – С. 33-43. (Scopus)
4. Лапин В.Н. Модель потерь бурового раствора в систему трещин в задаче определения параметров трещиновато-пористой среды // Выч. технологии. – 2019. – Т. 24 №4. – С. 38-55
5. Cherny S., Lapin V., Kuranakov D., Alekseenko O. 3D model of transversal fracture propagation from a cavity caused by Herschel-Bulkley fluid injection // Int. J. of Frac. – 2018. – Vol. 212, No. 1. – P. 15-40. (Wos , Scopus)
6. Карнаков П.В., Куранаков Д.С., Лапин В.Н., Черный С.Г., Есипов Д.В. Особенности распространения трещины гидроразрыва породы при закачке в нее смеси проппанта и жидкости // Теплофизика и аэромеханика. – 2018. – Т. 25, № 3. – С. 611-628.
7. Cherny S., Lapin V., Esipov D., Kuranakov D., Avdyushenko A., Lyutov A., Karnakov P. Simulating fully 3D non-planar evolution of hydraulic fractures // Int. J. of Frac. – 2016 – Vol. 201, No. 2 – P. 181-211. (Wos , Scopus)
8. Kuranakov D.S., Esipov D.V., Lapin V.N., Cherny S.G. Modification of the boundary element method for computation of three dimensional fields of strain-stress state of cavities with cracks // Eng. Fract. Mech. – 2016. – Vol. 153. – P. 302-318. (Wos , Scopus)
9. Есипов Д.В., Куранаков Д.С., Лапин В.Н., Черный С.Г. Математические модели гидроразрыва пласта // Выч. техн. – 2014. – Т. 19 №2. – С. 33-61
10. Карнаков П.В., Лапин В.Н., Черный С.Г. Модель гидроразрыва пласта, включающая механизм закупоривания трещины пропантом // Вестник НГУ. Серия: Инф. тех. – 2014. – Т. 12, № 1. – С. 19–33.

11. Cherny S., Chirkov D., Lapin V., etc. Two dimensional modeling of the near-wellbore fracture tortuosity effect // Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. – 2009. – Vol. 46, No. 6. – P. 992-1000. (WoS , Scopus)

В работах [1-11] были опубликованы основные результаты автора, представленные в диссертационной работе, причем работы [1, 4] являются персональными. В работе [3] предложена формулировка неявного глобального критерия распространения трещины и численный алгоритм его реализации, в работе [5] разработана численная модель движения жидкости сложной реологии в трещине и проведены исследования ее применимости на основе безразмерного анализа, в работах [7,8] предложена трехмерная модель распространения трещины и алгоритм совместного решения ее уравнений.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы ведущей организации, отзывы оппонентов, а также 6 отзывов на автореферат. Все отзывы положительные. Отзывы содержат ряд замечаний

**В отзыве ведущей организации ИГиЛ СО РАН:**

1. Предложенный в главе 1 алгоритм расчета продвижения трещины предполагает ненулевое продвижение фронта трещины вдоль всей её границы. Это предположение справедливо для распространения трещины в однородной среде, но может быть не выполнено, когда трещина встречается с неоднородностями: тогда граница может остановиться или даже двигаться обратно при локальном смыкании трещины. Типичные ситуации из нефтедобычи: ограничение роста трещины по вертикали при встрече с границами коллектора или прорыв трещины в соседние горизонты, сопровождаемое фрагментарным закрытием уже созданной трещины. Для большей практической ценности приведенный алгоритм нужно доработать до возможности описания локальной остановки и смыкания трещины.
2. При расчете дисковой трещины с перегибом в главе 2 показан спектр возможных форм трещины при различных значениях параметра  $\beta$  из

критерия разрушения. Остается открытым вопрос о том, какое же значение  $\beta$  наиболее соответствует реальной трещине?

3. Судя по приведенным на рис. 5.5 графикам, продвижение трещины отслоения цементной пробки от обсадной колонны вдоль оси скважины останавливается в случае задания постоянного фиксированного давления жидкости внутри трещины. В то же время эта ситуация схожа с развитием трещины гидроразрыва в трехслойном пласте с более высокими сжимающими напряжениями в верхнем и нижнем слоях (их роль здесь играет взаимное влияние боковых частей трещины, охватывающих пробку). В трехслойном пласте трещина, инициируемая постоянным давлением на забое, при отсутствии утечек может расти бесконечно. В рассматриваемом случае с пробкой этот эффект будет даже усиливаться за счет уменьшения гидростатических сжимающих напряжений вверх по стволу скважины. Неясен физический механизм, препятствующий продвижению трещины вдоль пробки.
4. Построенные в разделах 5.3 и 5.6 одномерные модели переноса проппанта в дисковой и прямой трещинах не позволяют описывать существенный на практике эффект развития неустойчивости Саффмана-Тейлора при переносе проппанта, что в совокупности с ограничением на геометрию трещины снижает практическую ценность полученных результатов. Эксперименты показывают, что при закупоривании трещины по механизму I (образование пробки в средней части трещины) в силу указанной неустойчивости жидкость пробивает каналы и размывает пробку, что не может быть описано в рамках одномерных моделей. Кроме того, дисковые трещины ГРП с радиусом в десятки метров редко реализуются на практике.

**В отзыве официального оппонента Смирнова Н.Н.:**

1. Хорошо известно, и автор упоминает об этом в тексте работы, что уравнения модели распространения трещины гидроразрыва относятся к параболическому типу. При этом модель движения жидкости в трещине

строится на основе уравнения эллиптического типа. Следует более подробно описать изменение типа уравнений при использовании предложенного алгоритма решения уравнений модели.

2. В п. 3.4.3. (стр. 112-114) предлагается использовать модель ньютоновской жидкости вместо реологической модели Гершеля-Балкли. При этом коэффициент в формуле (3.78) методически неправильно назван коэффициентом «вязкости», хотя содержит в себе характеристики не только жидкости, но и породы, а значит не является именно «вязкостью жидкости».
3. Все предложенные модели базируются на предположении об однородности горной породы, тогда как ее материал содержит множество естественных стратификаций. В перспективах дальнейшей работы указана возможность обобщения используемых моделей на случай неоднородного материала, но не очевидно возможно ли такое обобщение.

**В отзыве официального оппонента Татосова А.В.:**

1. В линейной связи между давлением и плотностью (3.35) следует подчеркнуть, является давление избыточным по отношению к атмосферному или пластовому. Формула, возможно, эмпирическая, а пластовое давление не фиксировано?
2. Может ли фронт жидкости догнать фронт трещины, как при этом работает формула (3.41)? Может ли давление между фронтами опуститься ниже порового; насколько это чувствительно для процесса развития трещины? Чем заполнено пространство между фронтами?
3. Не совсем ясно, как работают основные уравнения переноса вещества (5.91), (5.92) в режиме фильтрации жидкости гидроразрыва через пропантную упаковку (5.96), (5.97). Согласно формуле под (5.108), скорость протекания в грунт есть функция (5.13), но на стр. 243 сказано, что в данном режиме фильтрация в породу прекращается.



4. В главе 5 при описании жидкости гидроразрыва совместно с пропантом сохраняется ньютоновская реология. Можно ли использовать подход с кажущейся вязкостью в рамках модели Гершеля-Балкли? Уместно ли тогда представленное в работе усреднение свойств смеси по поперечной координате?
5. В работе имеются некоторое количество неточностей:
  - в формуле (3.1);
  - уравнение (3.10) записано некорректно, далее по тексту на стр. 94 «отбрасывание производных по времени в уравнении импульсов ...» в действительности соответствует безынерционному приближению;
  - соотношение (3.11) не обосновано, возможно, здесь опечатка;
  - в формулах (3.37) величина давления поменяла обозначение на заглавную;
  - между формулами (5.11) и (5.12) стоит слово на английском языке;
  - на стр. 246 «... сделана попытка продолжить описание эволюции: трещины путем учета фильтрации пропанта через пробку» — вероятно, имелась ввиду фильтрация жидкости гидроразрыва через пропантную пробку.

**В отзыве официального оппонента Осипцова А.А.:**

1. В иерархии моделей отсутствуют ветвящиеся трещины, которые характерны для распространения трещины ГРП в коллекторе с естественной трещиноватостью, например, в сланцах.
2. Пренебрежение пропантом – избыточное предположение. При инициации трещины проходит закачка чистой жидкости (также называемая в индустрии «подушкой» или «pad»)
3. Как рассчитывается лаг вблизи кончика трещины? Как лаг зависит от времени?
4. Почему не учтены коэффициент Био и модуль Био? Даже если нет дренажа, они должны войти в выражения для упругих коэффициентов.

5. Почему не учтены утечки жидкости из трещины во вмещающую породу?
6. Зачем учитывать предел текучести  $\tau_0$ , если инициация трещины в принципе не производится крослинкованным гелем, а используется линейный гель без предела текучести.
7. Кривизна стенок может вызвать значительные возмущения напряженного состояния, и, как следствие, вызвать разрушение породы. Эту возможность легко оценить, но это не сделано в работе. Судя по рисункам 4.37, при повороте трещины на ее берегах должны возникать значительные сжимающие и растягивающие напряжения, которые могут привести к возникновению очагов упругопластического деформирования и выкрашиванию породы. Представляет интерес сравнить максимальные касательные напряжения с пределом прочности реальных горных пород.
8. Также хотелось бы поднять вопрос о необходимости очертить область применимости модели. Расчет 20 шагов по времени длится 4 часа на персональном компьютере. Как можно было бы обозначить практическую пользу от полученного решения, помимо несомненной фундаментальной значимости. В каких ситуациях расчет короткого интервала времени в 3D модели позволит судить о дальнейшей траектории и применить, например, планарные модели для дальнейшего расчета в найденном направлении?
9. Формула (5.53) и далее. Использовано значение  $C^*=0.74$  (решение задачи о регулярной гексагональной плотной упаковке сфер) для максимальной концентрации плотной упаковки одинаковых сферических частиц проппанта, в то время как в реальности на практике это значение никогда не достигается. Максимальная концентрация случайной плотной упаковки сфер лежит в диапазоне 0.52-0.65 (различают random loose packing и random close packing, а именно упаковка при первичном соприкосновении частиц и плотная

неулучшаемая упаковка под действием сдвигивающих напряжений от стенок трещины). В моделях транспорта проппанта, имплементированных в коммерческих симуляторах ГРИ транснациональных нефтесервисных компаний, как правило, принято значение  $C^*=0.65$ .

10. С. 193, критерий закупоривания трещины проппантом. Автор диссертации предлагает рассматривать критерий закупорки трещины частицами проппанта лишь в виде предельной максимальной объемной концентрации частиц, в то время как феномен бриджинга (возникновения “мостика” из частиц поперек трещины) является существенно зависимым от локальной геометрии, а именно от соотношения размеров ширины трещины и диаметра частиц. В литературе (Gruesbeck&Collins 1982) был предложен полу-эмпирический критерий бриджинга в виде  $w^*=2.5d$ , где  $w^*$  это критически малая ширина трещины, при которой начинается закупоривание, а  $d$  это диаметр частиц проппанта. Впоследствии данный кинематический критерий был обобщен и был предложен динамический критерий бриджинга, учитывающий также силы взаимодействия между частицами и со стенками трещины, а также силы вязкого трения, действующие со стороны жидкости на остановившиеся частицы проппанта (Garagash, I. A., Osiptsov, A. A., & Boronin, S. A. (2019). Dynamic bridging of proppant particles in a hydraulic fracture. *International Journal of Engineering Science*, 135, 86-101.) Рассматриваемый в диссертации критерий остановки движения частиц при достижении значения объемной концентрации плотной упаковки скорее подходит для описания формирования осадка частиц, осаждающихся под действием гравитации на дно трещины, где действительно остановка их движения происходит при достижении плотной упаковки. Вообще говоря, в областях трещины, где на ширину приходится 2-3 зерна проппанта, приближение сплошной среды уже перестает быть

применимо, и поэтому само использование концепции объемной доли частиц может быть некорректным, поэтому рекомендуется в качестве критерия использовать геометрический критерий бриджинга (кинематический или динамический).

**В отзыве на автореферат д.ф.-м.н. профессора Ковени Виктора Михайловича, главного научного сотрудника лаборатории математического моделирования ФГБУН ФИЦ ИВТ:**

1. При описании внешнего итерационного процесса (стр. 15-16 автореферата) отмечается, что давление определяется методом итерации с релаксацией для получения сходимости с точностью 1-2%. В автореферате не указано число итераций и их зависимость от точности.
2. В автореферате утверждается о малом влиянии слабосжимаемой жидкости на течение в закачиваемой жидкости по сравнению с несжимаемой жидкостью (стр. 27). А что можно было ожидать существенно иного результата?

**В отзыве на автореферат д.т.н. профессора Кашникова Юрия Александровича, заведующего кафедрой Маркшейдерское дело, геодезия и геоинформационные системы Горно-нефтяного факультета ФГАОУ ВО «ПНИПУ»:**

1. В качестве замечания можно указать отсутствие в автореферате описания характеристик программного комплекса трехмерного моделирования распространения трещины
2. Естественным приложением разработанной модели, способной описывать распространение нескольких трещин в окрестности скважины, было бы описание распространение одной новой трещины при наличии уже развитой существующей. Эта актуальная задача, связанная с технологией повторного или направленного гидроразрыва, в диссертации рассмотрена не была.

**В отзыве на автореферат д.ф.-м.н. Шифрина Ефима Ильича, заведующего лабораторией механики прочности и разрушения материалов и конструкций ИПМех РАН:**

1. Предложенный критерий роста трещины содержит параметр  $\beta$ . Связь этого параметра с механическими характеристиками материала не установлена. В результате, для применения предлагаемого критерия к росту трещины в конкретном материале требуется проведение дополнительных экспериментов. Интересно было бы выяснить возможность определения этого параметра по тем или иным механическим характеристикам материала
2. В диссертации рассмотрен процесс роста трещины из зародышевой трещины. Вопросы, связанные с образованием самой зародышевой трещины в работе не рассматриваются

**В отзыве на автореферат д.ф.-м.н. Турунтаева Сергея Борисовича, директора ИДГ РАН:**

1. Судя по автореферату, верификация модели проводилась на ряде экспериментов, в которых трещина образовывалась в условиях трехточечного изгиба однородного материала (брус из полиметилметакрилата, диск из полиуретана), что не соответствует условиям проведения гидроразрыва пласта.
2. Распространение трещины ГРП происходит в существенно неоднородной среде, как правило, с существующей трещиноватостью. Поэтому верификации модели изменения направления роста трещины только на однородных материалах может рассматриваться как приближение.
3. В автореферате отсутствуют упоминания о сопоставлении предложенной модели с экспериментами, непосредственно моделирующими ГРП.
4. Слабым местом модели может явиться отсутствие учёта утечек жидкости и диффузии давления жидкости в пласт.

**В отзыве на автореферат д.т.н., профессора Кузнецовой Виктории Николаевны, проректора по научной работе и цифровой трансформации СибАДИ:**

1. Какие граничные условия определены автором диссертации при разработке моделей для интерпретации движения жидкости в трещине.
2. Не указаны направления и перспективы дальнейших исследований автора по теме диссертации

**В отзыве на автореферат д.ф.-м.н., профессора РАН Шишленина Максима Александровича, заместителя директора по научной работе ИМ СО РАН:**

1. На стр. 13 указано, что на каждом шаге распространения трещины отыскивается распределение давления по поверхности трещины, но описанная на стр. 20-22 модель позволяет рассчитать давление только на той части поверхности, что занята жидкостью. Из каких соображений задается давление на оставшейся части трещины – «лаге»?

Имеется также акт, подтверждающий использование результатов диссертации в ООО «Технологическая компания Шлюмберже», акт утвержден директором филиала в г. Новосибирске Ф.Н. Литвинец, подписан инженером по моделированию Д.В. Банниковым. Акт включен в качестве приложения в текст диссертации.

**Выбор официальных оппонентов** и ведущей организации обосновывается квалификацией и большим опытом в областях математического моделирования механики трещин, описания жидкостей сложной реологии, разработки численных методов и их приложений, что подтверждается их многочисленными научными публикациями по тематике диссертационной работы (перечень публикаций отражен в сведениях, представленных на сайте организации, где проходила защита). Так, ведущая организация ИГиЛ СО РАН более 15 лет выполняет исследования по тематике гидроразрыва пласта на основе технологии как вычислительного,

так и лабораторного эксперимента. Д.ф.-м.н. Головин С.В., подписавший отзыв ведущей организации, кроме того возглавляет НОЦ «Газпромнефть – НГУ», открытый в Новосибирском государственном университете совместно с одной из крупнейших отраслевых компаний мира. Оппонент Смирнов Н.Н. является известным в России специалистом по механике сплошной среды, теории фильтрации, решению дифференциальных уравнений. Он автор более 50 научных статей и учебных пособий по механике трещин гидроразрыва, под его руководством подготовлено два кандидата наук по тематике рассматриваемой диссертации. Оппонент Татосов А.В. обладает двадцатилетним опытом в области разработки и численной реализации моделей трещин гидроразрыва пласта и других способов воздействия продуктивный пласт, что говорит о его высоком уровне компетентности в освещаемых в диссертации вопросах. О компетентности оппонента Осипцова А.А. в области разработки моделей движения жидкостей в трещинах свидетельствует диссертация «Модели механики многофазных сред для технологии гидроразрыва пласта» защищенная им в 2017 г., в которой обобщаются наиболее современные подходы в этом направлении математического моделирования.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

- **разработана** трехмерная математическая модель распространения существенно трехмерной, криволинейной трещины при закачке в нее жидкости сложной реологии, описывающая одновременно движение жидкости сложной реологии в трещине, деформацию и разрушение породы с определением направления распространения трещины в условиях сложного нагружения;
- **разработана** численная модель движения жидкости сложной реологии в канале малой ширины, учитывающей как наличие критического напряжения сдвига, так и нелинейную связь тензоров скоростей деформаций и напряжений;

- **доказана** применимость модели ньютоновской жидкости для описания жидкости сложной реологии, движущейся в трещине гидроразрыва на начальном этапе ее распространения;

- **разработан** новый полностью трехмерный неявный глобальный критерий скорости роста трещины и выбора направления ее распространения, в котором вместо предсказания направления распространения в каждой отдельной точке фронта анализируются возможные конфигурации фронта в целом, получающиеся после продвижения трещины.

Это позволяет адекватно описывать распространение трещины при сложном нагружении, вызывающем наличие всех трех мод коэффициента интенсивности напряжений;

- **предложена** иерархия моделей трещин, распространяющихся под действием закачиваемой жидкости, построенная на основе упрощающих предположений о геометрии трещины;

- **разработан** метод решения связанной системы интегральных и дифференциальных уравнений в области со свободными границами и нелинейной связью между искомыми функциями, формирующейся на каждом шаге в трехмерной модели распространения существенно трехмерной, криволинейной трещины;

- **разработан** программный комплекс для решения задач распространения трещины от полости в упругой среде и по границе между материалами при закачке в них вязкой жидкости;

- **решена** задача криволинейного распространения трещины от скважины в породе под действием давления закачиваемой в нее вязкой жидкости гидроразрыва. Результатом решения задачи являются зависимости давления в скважине от времени, распределения раскрытия трещины и давления вдоль поверхности трещины, форма самой поверхности трещины. Исследован процесс распространения трещины при ее инициации в направлении, не совпадающем с направлением предпочтительного распространения.



**Теоретическая значимость исследования** заключается в

- создании технологии математического моделирования распространения трехмерных криволинейных трещин, нагруженных давлением вязкой жидкости, в хрупком упругом материале в условиях его анизотропного нагружения;

- разработке математической модели распространения трещины, позволяющей одновременно описывать деформацию материала в трехмерной области сложной формы, изменение направления распространения трещины и ее раскрытия под действием анизотропного нагружения материала, движение в трещине жидкости сложной реологии.

- выявлении механизмов и параметров, влияющих на траекторию и раскрытие трещины на ранней стадии ее распространения от полости (формы полости, реологии жидкости, закачиваемой в полость и трещину, параметров напряженного состояния среды, ее упругих свойств и т.д.);

- разработке неявного глобального критерия распространения трещины, предсказывающего направление ее развития на основе анализа возможных конфигураций линии фронта после ее продвижения с учетом взаимного влияния точек фронта;

- определении областей применимости моделей для описания движения жидкости в распространяющейся трещине и обосновании возможности применимости модели ньютоновской жидкости для описания движения жидкости сложной реологии.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что**

- разработана технология математического моделирования распространения трехмерных криволинейных трещин, которая позволяет учитывать одновременно анизотропность напряженного состояния коллектора, существенно трехмерную криволинейную форму трещины в окрестности скважины и сложную реологию жидкости на начальном этапе

- распространения трещины, что позволяет использовать ее для усовершенствования и создания новых технологий гидроразрыва пласта;
- создан и валидирован неявный глобальный критерий распространения трещины, позволяющий на качественно новом уровне предсказывать направление распространения трещины при сложном анизотропном нагружении, в том числе при наличии изломов ее поверхности;
  - показана возможность применимости модели ньютоновской жидкости для описания движения жидкости сложной реологии в трещине, обоснована методика вычисления параметров модели;
  - определены области изменения параметров операции гидравлического разрыва пласта, приводящие к пережатию трещины гидроразрыва в окрестности скважины;
  - установлены зависимости стойкости гидроизоляции скважин от параметров и дефектов цементной пробки, проведены оценки времени, в течение которого гидроизоляция скважины может противостоять повышению порового давления в породе;
  - результаты диссертационного исследования использовались в практической деятельности ООО «Технологическая компания Шлюмберже».

**Оценка достоверности результатов исследования** выявила:

- достоверность разработанных в диссертационной работе моделей, методов, алгоритмов и программного обеспечения **обеспечивается** использованием в качестве основы моделирования фундаментальных законов механики разрушения, механики жидкости, механики твердого тела, выбором теоретически обоснованных численных методов, и **подтверждена** результатами их верификации и валидации;
- верификация и валидация проводились путем сопоставления результатов численного моделирования с известными аналитическими решениями, экспериментальными данными и расчетами других исследователей.

**Личный вклад соискателя** состоит в:

- разработке и верификации трехмерной математической модели трещины, распространяющейся под действием закачиваемой жидкости, за исключением метода решения уравнений упругого равновесия и определения коэффициентов интенсивности напряжений;
- разработке модели движения в жидкости сложной реологии в трещине и ее численной реализации;
- формулировке, численной реализации и валидации неявного критерия распространения трещины;
- создании иерархии моделей трещин, разработке и реализации входящих в нее моделей;
- исследовании эффекта пережатия трещины на основе численного моделирования;
- исследовании стойкости гидроизоляции скважины с использованием созданной численной модели трещины;

В ходе защиты диссертации Вопросы соискателю задавали: председатель диссертационного совета академик РАН д.ф.-м.н. Б.Н. Четверушкин, члены диссертационного совета: чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. В.Ф. Тишкин, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. М.В. Якобовский, д.ф.-м.н. В.А. Гаранжа, д.ф.-м.н. А.В. Колесниченко, д.ф.-м.н. И.С. Меньшов. На все поступившие вопросы и замечания соискатель дал исчерпывающие ответы и пояснения.

На заседании 23 марта 2023 г. диссертационный совет постановил: за комплекс результатов, дающих решение крупной научно-технической проблемы создания методов моделирования распространения трещин в хрупкой упругой среде под воздействием движения вязкой жидкости, что имеет большое значение для народного хозяйства в части разработки способов интенсификации добычи углеводородов, присудить Лапину В.Н. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за - 16, против - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Председатель

диссертационного совета 24.1.237.01

академик, д.ф.-м.н., профессор

Четверушкин Борис Николаевич

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.237.01

к.ф.-м.н. Корнилина Марина Андреевна



23.03.2023