



**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**имени М.В.ЛОМОНОСОВА**

**МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

---

---

Отзыв научного руководителя  
доктора физико-математических наук, профессора  
Карликова Владимира Павловича

на диссертационную работу Канина Евгения Алексеевича по теме «Асимптотические модели процессов массопереноса в задаче роста трещины гидроразрыва», представленную на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

За время обучения в аспирантуре механико-математического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова Каниным Е.А. проведено исследование влияния важных гидродинамических эффектов на распространение трещины гидроразрыва пласта.

Во-первых, Е.А.Канин изучил процесс роста трещины гидроразрыва с учетом массообмена между трещиной и окружающим проницаемым пластом, скорость которого зависит от давления внутри канала трещины, рассмотрев сначала модель полубесконечной трещины, а затем модель радиальной трещины. Первая модель детально описывает физические процессы, реализующиеся вблизи фронта трещины, разрешает их влияние на процесс роста и используется в различных моделях трещин с конечной геометрией в качестве критерия распространения. Вторая модель рассмотрена в диссертации как пример конечной трещины гидроразрыва, имеющей упрощенную геометрию и обладающей практической значимостью. В большинстве моделей роста трещины гидроразрыва предполагают, что скорость утечек описывается феноменологическим законом Картера. В диссертации Евгений уточнил данный закон, учитывая зависимость скорости утечек от давления и сохраняя при этом предположение об одномерности диффузии давления в горной породе, происходящей перпендикулярно поверхности трещины. Проведенный в диссертации анализ включал выявление физических особенностей трещины гидроразрыва, связанных с изучаемым гидродинамическим фактором, вывод предельных режимов распространения полубесконечной трещины, определение случаев, в которых закон Картера позволяет получить решение для полубесконечной трещины и

радиальной трещины с приемлемой точностью и, наоборот, когда необходимо при моделировании роста трещины учитывать уточненный механизм массообмена, зависящий от давления внутри канала трещины.

Во-вторых, Е.А.Канин проанализировал комбинированное влияние ламинарно-турбулентного течения «скользящей воды» внутри канала трещины и утечек жидкости гидроразрыва в пласт (по закону Картера) на распространение полубесконечной трещины и радиальной трещины. Несмотря на то, что в большинстве случаев влияние турбулентного течения на процесс роста трещины невелико, оно усиливается при наличии утечек. В диссертации получены предельные режимы распространения полубесконечной трещины и радиальной трещины аналитическими и полуаналитическими методами, а также определены их области применимости внутри параметрических пространств. Проведя сравнение ламинарно-турбулентного и ламинарного решений для осесимметричной трещины, Е.А.Канин оценил характерные интервалы времени от инициализации трещины, в течение которых смена режима течения оказывает влияние на ее параметры.

Наконец, Е.А.Канин исследовал влияние вязкопластической реологии жидкости гидроразрыва на эволюцию радиальной трещины. В диссертации решена задача роста радиальной трещины, распространяющейся под влиянием жидкости с реологией Гершеля-Балкли. По сравнению с более простым случаем радиальной трещины, заполненной жидкостью гидроразрыва со степенной реологией, решение имеет два дополнительных предельных режима распространения, связанных с доминированием предела текучести. Построенные карты режимов демонстрируют интервалы значений определяющих параметров, при которых наличие предела текучести жидкости гидроразрыва необходимо учитывать при моделировании эволюции трещины.

Диссертация состоит из введения, четырех основных глав и заключения. Полученные результаты вносят важный вклад в развитие механики роста трещины гидроразрыва, распространяющейся под влиянием жидкостей с ньютоновской и неньютоновской реологией в проницаемой горной породе. Несмотря на фундаментальный характер исследований, в работе проведена связь построенных решений с промышленными случаями, встречающимися при разработке месторождений. Представленные результаты и разработанные модели имеют практическую значимость. Например, выделенные области внутри параметрических пространств, внутри которых изучаемые гидродинамические эффекты оказывают значительное влияние на распространение радиальной трещины, позволяют потенциальному читателю принять решение о необходимости учета эффекта при дизайне трещины гидроразрыва и проектировании промышленных работ. Модели конечного элемента могут быть встроены в модели конечной трещины гидроразрыва (Planar3D, EP3D) в качестве критерия распространения, как это было продемонстрировано во второй главе

диссертационной работы. Модели радиальной трещины могут быть использованы для симуляции роста трещины на начальном этапе распространения и для верификации работы численных симуляторов для моделирования трещин со сложной геометрией.

Основные результаты диссертации изложены в 5 печатных работах, из них 3 статьи опубликованы в изданиях, индексируемых в Web of Science и/или Scopus, среди которых профильные журналы из первого квартала: Journal of Fluid Mechanics, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, and Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. По материалам диссертации было сделано 5 докладов на профильных научных семинарах. Результаты работы были представлены на ряде международных (от сообществ AGU, EAGE, ECCOMAS) и всероссийских (организованных компаниями Лукойл и Роснефть) конференций.

В 2020 г. Евгений был удостоен звания победителя за лучший доклад в секции «Геомеханическое моделирование и ГРП» на конференции «Цифровые технологии в добыче и переработке углеводородов: от моделей к практике». Евгению была присуждена стипендия Правительства РФ за 2021/2022 уч. г. за достижения в научных исследованиях.

Диссертационная работа «Асимптотические модели процессов массопереноса в задаче роста трещины гидроразрыва» Канина Евгения Алексеевича выполнена на высоком научном уровне и носит законченный характер. Она соответствует специальности 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы» и удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационная работа «Асимптотические модели процессов массопереноса в задаче роста трещины гидроразрыва» Канина Евгения Алексеевича может быть рекомендована к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы».

Я, Карликов Владимир Павлович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Научный руководитель: Карликов Владимир Павлович  
доктор физико-математических наук  
профессор, заведующий кафедрой гидромеханики  
механико-математического факультета  
МГУ имени М.В.Ломоносова  
(119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, механико-математический факультет.  
телефон: +7 (495) 939-39-58, e-mail: karlikov@mech.math.msu.su)

 В.П. Карликов

Подпись профессора В.П. Карликова удостоверяю:  
декан механико-математического факультета  
МГУ имени М.В.Ломоносова,  
член-корреспондент РАН, профессор



А.И. Шафаревич

«11» 11 2022 г.