

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертацию Диля Дениса Олеговича

на тему: **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СМЕСИ ГАЗОВ  
ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ ОТРАБОТАННЫХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Актуальность избранной темы.** Созданная автором численная программа расчета трехмерной нестационарной модели процесса фильтрации воды и газов в пришахтной области, с учётом процессов адсорбции и диффузии газов в угольных породах, является актуальной для моделей многофазной фильтрации метана из неразработанных угольных пластов с параллельным захоронением углекислого газа и для построения оптимальных стратегий разработки нефтегазовых месторождений.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Обоснованность применения метода конечных объёмов и использование нелинейной двухточечной схемы второго порядка точности при аппроксимации потоков на гранях, для расчёта процесса двухфазной многокомпонентной фильтрации в анизотропном по проницаемости пространстве, подтверждено в главах 2 и 3 диссертации исследованием аппроксимационной сходимости, сравнением с полученными автором аналитическим и численным решениями задачи Бакли-Левретта для многокомпонентной газовой фазы, и расчётами другими численными методами.

Уравнения процесса вытеснения смеси газов при затоплении шахтной выработки, моделирующие процессы диффузии и адсорбции в микро- и макропорах пород записаны автором в виде общепринятых уравнений механики гетерогенных сред, но с конкретным видом источников вследствие диффузии адсорбированных газов, поступающих с поверхностей макропор и микропор угля. Необходимость учёта указанных диффузионных процессов при затоплении отработанных угольных шахт подтверждено численными расчётами процесса затопления шахтной выработки для случаев их учёта и не учета.

**Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Разработана вычислительная технология, позволяющая проводить исследования нестационарных трехмерных процессов двухфазной многокомпонентной фильтрации в трещиновато-пористом анизотропном пространстве и обладающая необходимыми возможностями для обобщения на случаи учёта явлений диффузии и адсорбции газов в порах угольной породы; сформулирована модель тройной пористости и двойной проницаемости, описывающая процессы фильтрации,

диффузии и адсорбции газов, а также фильтрации воды в угольной породе, и впервые по указанной технологии проведен трехмерный расчет в анизотропной среде процесса вытеснения метана из угольной породы при затоплении шахты грунтовыми водами. Достоверность расчетов подтверждена соответствием полученных результатов с аналитическими решениями и качественным согласованием с имеющимися экспериментальными данными.

**Значимость для науки и практики полученных автором результатов** заключается в создании вычислительной технологии и программы расчета нестационарной трехмерной фильтрации в анизотропной пористой среде. Программа создана для решения важных для страны задач по оценке влияния техногенных предприятий (в том числе и атомных) на подземное пространство, по прогнозу и предотвращению загрязнения грунтовых вод, мониторингу скоплений метана при затоплении отработанных угольных шахт.

**Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.** Разработанная программа численного расчета нестационарных трехмерных фильтрационных течений в анизотропной пористой среде может быть рекомендована для исследования возможных сценариев затопления закрываемых шахт с целью выработки оптимальной стратегии и рекомендаций по использованию погружных насосов. Существенна экономическая выгода использования программы для учета экологических последствий при фильтрации загрязненных грунтовых вод в атомной отрасли, в сельском хозяйстве, при анализе последствий фильтрации загрязнений в водоемы. Вывод о необходимости учёта диффузии газов адсорбированных на поверхностях пор может быть рекомендован для учета при моделировании подобных фильтрационных процессов.

**Оценка содержания диссертации, ее завершенность.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 70 наименований. Во введении и главе 1 на основе имеющихся в литературе экспериментальных и теоретических исследований сформулированы требования к модели и вычислительной технологии расчета нестационарной трехмерной фильтрации в анизотропной среде, учитывающей влагонасыщенность в порах и изменение сорбционных характеристик породы при адсорбции метана. В завершающей главе 4 представлена математическая модель «тройной пористости (трещины, макропоры и микропоры) и двойной проницаемости (трещины, макропоры)» фильтрации метана и воды и на основе, разработанной в главах 2 и 3 вычислительной технологии, исследован процесс вытеснения газов водой при затоплении шахтной выработки. В главе 2 описана и протестирована вычислительная технология, представлены тестовые расчеты, которые сравнены с расчетами другими численными технологиями на примере исследования более простой модели (без учета диффузии и адсорбции) двухфазной фильтрации в

анизотропной среде. В главе 3 обосновано применение аппроксимационных схем, разработанных в диссертации, путем сравнения численных расчетов с аналитическим решением задачи Бакли-Левретта фильтрации двух несжимаемых жидкостей. В целом, диссертация Диля Д. О. является завершенной работой, оформленной в соответствии с требованиями. Автореферат диссертации соответствует изложенному материалу в диссертации и содержит в списке литературы работы автора, в которых опубликованы все основные идеи, методы и выводы диссертации.

**Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, мнение о научной работе соискателя в целом.** Диссертация написана ясным языком с небольшим количеством редакторских ошибок. Понятно сформулированы физико-математические модели и граничные и начальные условия для систем нестационарных уравнений. Удачно выбрана нестационарная постановка задачи фильтрации, которая позволяет решить проблему эллиптичности стационарного уравнения для давления, а именно, не определять на неизвестной выходной границе граничные условия для давления, влагонасыщенности и мольных концентраций газов. При этом стационарное решение может быть получено путем установления к стационарному решению для заданных стационарных граничных условий на входе. Конструкция физико-математической модели проста, но понятно, как может быть усложнена, если необходимо будет учесть большее число газовых компонент, а вычислительная технология, по сути, останется той же самой.

В качестве недостатка следует отметить, что в главе 1 мало уделено внимания обзору и сравнению с вычислительной технологией автора известных пакетов прикладных программ для расчета многофазной трехмерной нестационарной фильтрации в трещиновато-пористой среде, например: **MODFLOW** – программа Геологической службы США, реализующая блочно-центрированный балансый метод конечных разностей применительно к условиям нестационарного трехмерного, неоднородного по фильтрационным свойствам потока; **MT3DMS** – программа, позволяющая решать трехмерные задачи конвективно-дисперсионного массопереноса с учетом линейной и нелинейной сорбции, двойной пористости и позволяет производить расчеты многокомпонентной миграции загрязняющих веществ без химических реакций между отдельными компонентами (в конце 1980-х годов гидрогеологические исследования на основе указанных программ позволили установить факт загрязнения подземных вод в районе Байкальского целлюлозно-бумажного комбината); пакет программ **НИМФА** для решения задач геоэкологии, гидрогеологии, нефтедобычи, а также фильтрации в технологических процессах, предназначенный для численного моделирования трехмерного нестационарного

течения в пористых средах (анизотропных, трещиноватых), миграции многокомпонентных загрязнений (с учетом адсорбции, дисперсии и химического взаимодействия между мигрирующими растворами) и другие пакеты программ.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Диссертация Дилия Дениса Олеговича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задач, создание модели и вычислительной технологии расчета многофазной фильтрации в трещиновато-пористой среде с диффузией и адсорбцией на поверхности пор. Указанные модели и вычислительная технология необходимы для оценки влияния техногенных предприятий (в том числе и атомных) на подземное пространство; для прогноза и предотвращения загрязнения грунтовых вод; для мониторинга скоплений метана при затоплении отработанных угольных шахт; и имеют существенное значение для экологии и безопасности, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Официальный оппонент –

профессор кафедры «Ремонт судовых машин и механизмов»

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова»,

доктор физико-математических наук,

старший научный сотрудник

Бушланов Владимир Петрович

Сведения об организации:

почтовый адрес: 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93; тел. (8617) 71-75-25;

e-mail: mail@nsma.ru, web-сайт: http://aumsu.ru.

Подпись Бушланова В.П. заверяю  
Первый проректор  
ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова



И.В.Маричев

3 декабря 2015 г.