

Отзыв

официального оппонента доктора технических наук Сергея Геннадьевича Семенова на диссертационную работу Куцепалова Владимира Александровича «Особенности загрязнения и реабилитации сильно контрастных геологических сред», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» в диссертационный совет Д 002.070.01.

Проблема загрязнения окружающей среды, безусловно, является актуальной, и с каждым годом требует к себе все большего внимания. Решение данной проблемы охватывает большое количество мероприятий, среди которых математическое моделирование занимает существенное место. Определенные в теме диссертации исследования процессов загрязнения и реабилитации геологических сред представляют большой интерес с точки зрения решения ряда практически важных задач, таких как роль инженерных барьеров в подземных захоронениях РАО, описание динамики и эффективности вымывания загрязнений из геологических пород, использование проницаемых химически-активных барьеров, препятствующих переносу опасных примесей грунтовыми водами.

Важной особенностью геологических сред является то, что они обладают крайне неоднородной структурой с сильным контрастом свойств соседних областей, и описание переноса в таких средах с помощью упрощенных моделей адвекции-диффузии, когда свойства среды характеризуются средними скоростью адвекции и коэффициентом дисперсии, не всегда оправдано. Напротив, использование «двупористой модели», учитывающей быстрый перенос по системе хорошо проницаемых каналов и задержку примеси в слабопроницаемой пористой матрице, в ряде случаев вполне обоснованно. Так, рассмотренная в диссертации задача выхода загрязнений в геологическую среду при наличии инженерного барьера проницаемости, окружающего источник, впервые самосогласованно учитывает как действие барьера, так и характер переноса в такой двупористой геологической среде.

Не меньший интерес представляет проблема реабилитации загрязненных территорий. В диссертации проанализирован один из практических методов, а именно выщелачивание загрязнений в процессе прокачки флюида через геологическую среду. Автором показано, что резкий контраст свойств среды играет важную роль в определении динамики вымывания загрязнений. Предложен и проанализирован нетривиальный способ повышения эффективности данного метода путем добавления в прокачиваемый флюид коллоидных частиц, способных адсорбировать загрязнения. Используемый здесь эффект в некотором смысле является эффектом обратным ускорению переноса примеси в двупористой среде при наличии адсорбирующих примесей коллоидов.

Установка на пути потока загрязненных грунтовых вод Проницаемых Химически-Активных Барьеров также относится к классическим методам реабилитации загрязненных территорий. Считается, что преимуществом этого способа реабилитации является то, что после установки барьера практически не требуется затрат на обеспечение его функционирования (фильтрация грунтовых вод происходит под действием естественного напора). Основные исследования, связанные с этим методом, касаются поиска новых сорбирующих веществ для заполнения барьера. В диссертации рассматриваются барьеры, действие которых основано на сорбции загрязнения на поверхности гранул материала, слагающего барьер. Анализируется эффективность использования таких барьеров исходя из двух требований: с одной стороны, для эффективного действия барьера нужно, чтобы площадь поверхности, сорбирующей загрязнения, была максимальной, с другой стороны, необходимо обеспечить достаточно высокую проницаемость барьера, чтобы исключить его обтекание загрязненными грунтовыми водами. Самосогласованный учет этих требований приводит к существенным ограничениям на эффективность барьера, где в качестве оценки эффективности автором предлагается рассматривать отношение толщины барьера к размеру очищаемой области в направлении течения грунтовых вод. И здесь автором предложен способ повышения эффективности барьера за счет заполнения барьера сорбирующим веществом с двупористой структурой.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Основной материал диссертации изложен на 94 страницах машинописного текста, включающего 19 иллюстраций.

Во **Введении** автор обосновывает актуальность диссертационного исследования, определяет цель и задачи диссертационной работы, подтверждает научную новизну и практическую значимость полученных результатов, формулирует выносимые на защиту положения, представляет личный вклад автора, доказывает достоверность и обоснованность выводов сравнением с результатами других исследований и верификацией данных с оценками других научных коллективов.

В **Главе 1** исследуется влияние низко проницаемого барьера, окружающего источник примеси, на характеристики переноса в сильно контрастной, двухпористой среде. При описании динамики выхода примеси за пределы барьера определены характерные времена, связанные с параметрами самого барьера. Рассмотрено возможное наличие «проколов» - очень редких, но хорошо проводящих дефектов барьера. На основе полученной зависимости скорости выхода примеси за пределы барьера от времени, рассчитаны режимы переноса во внешней среде. Автор показывает, что при наличии барьера, перенос может быть описан формулами такими же, как для безбарьерного случая, но путем введения эффективного времени. Похожие задачи ранее рассматривались группой авторов, к которой принадлежит диссертант, но для других типов сред. Применительно к наиболее часто встречающимся, и поэтому представляющими наибольший интерес, статистически однородным резко контрастным средам задача решена впервые.

В **Главе 2** рассмотрены различные способы реабилитации загрязненных территорий, предложена модель выщелачивания примеси из среды для случая, когда среда обладает двухпористой структурой. В данном случае, диффузионный выход примеси из пористой матрицы является процессом, лимитирующим скорость очистки среды. Автором построена модель, которая самосогласованно описывает диффузию примеси по слабопроницаемой матрице и вынос примеси из загрязненной области в результате адвекции. Автором показано, что можно выделить два этапа очистки среды. На первом этапе происходит лишь частичное

вымывание примеси, и только на втором этапе формируется почти полностью очищенная область. Представляются полезными оценочные формулы для характерных времен и скорости формирования областей, и степени очистки в них в зависимости от параметров среды и скорости течения.

В **третьей Главе** исследован интересный эффект влияния коллоидных частиц, способных адсорбировать примесь, на перенос примеси в резко контрастной среде. В первой части главы развита модель переноса примеси в среде при наличии источника загрязнения. Из результатов модели следует, в общем-то, известный факт, что наличие коллоидов приводит к существенному ускорению переноса примеси по сравнению со случаем, когда коллоиды отсутствуют. Во второй части главы рассмотрен эффект добавления сорбирующих коллоидов во флюид, используемый для очистки загрязненной среды, в рамках модели, развитой в Главе 2. Здесь получен интересный результат, что наличие сорбирующих коллоидов приводит к ускорению роста области, в которой имеет место практически полная очистка среды от примеси.

Глава 4 содержит исследование эффективности действия проницаемых сорбирующих барьеров. Для установления связи удельной адсорбирующей площади материала барьера с его проницаемостью используется несколько упрощенная модель Кармана-Козени. Далее автором рассмотрена задача распространения примеси в геологической среде с барьером. Отмечу отличие данной постановки от основной массы исследований, ограничивающихся изучением характеристик переноса примесей непосредственно в барьере для различных материалов барьера. Исходя из решения поставленной задачи, а также из установленной связи между проницаемостью и сорбционными свойствами барьера, автором определены ограничения на минимальную толщину барьера. Важным представляется утверждение, что использование барьера с двупористой структурой позволяет существенно смягчить требования к необходимой толщине барьера, тем самым повышая эффективность его действия. Также показано, что на больших временах начинается обратное вымывание загрязняющей примеси из барьера в окружающую среду, что необходимо исключить. Приведена оценка

времени, по достижении которого данный процесс обратного вымывания загрязнений из барьера становится существенным.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Достоверность полученных в работе результатов обусловлена современным уровнем теоретического анализа и там, где было возможно, качественными, физически прозрачными, оценками и сравнением с экспериментом.

Практическая ценность диссертации В.А. Куцепалова состоит в том, что ее результаты дают важный материал для анализа эффективности и оптимизации действия заградительных барьеров при подземном захоронении РАО, а также для усовершенствования метода выщелачивания примеси в резко контрастных геологических средах и оптимизации действия проницаемых сорбирующих барьеров при реабилитации загрязненных территорий.

Я бы отметил следующие вопросы и замечания к работе.

1. При исследовании эффектов коллоидного переноса автор полагает, что скорость коллоидных частиц равна скорости жидкости в системе хорошо проницаемых каналов. Это утверждение требует обоснования, хотя бы качественного.
2. Изображение результатов модели на Рис. 17 представляется не совсем удачным. Из подписей на Рис. 17 можно было бы заключить, что очистка за счет присутствия коллоидов имеет место только в области закрашенной голубым, хотя коллоиды участвуют в процессе очистки во всей области левее фронта.
3. В диссертации и автореферате имеются досадные огрехи оформления.

Сделанные замечания, однако, никак не сказываются, на общей высокой оценке работы.

Диссертацию отличает четкий и ясный стиль изложения.

Основные результаты диссертации опубликованы в авторитетных отечественных и зарубежных научных журналах, а также неоднократно

докладывались на конференциях, в том числе, международных. Автореферат в полной мере отражает содержание работы.

Работа представляет собой законченное оригинальное исследование, имеющее важное научное и прикладное значение. Диссертация В.А. Куцепалова удовлетворяет требованиям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней» утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, паспорту специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и отрасли науки «физико-математические науки», а её автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Официальный оппонент

С.Г. Семенов

Подпись С.Г. Семенова заверяю

Главный ученый секретарь

НИЦ «Курчатовский институт»



Еремин И.И.

Адрес, телефон, e-mail организации:

Национальный Исследовательский Центр

«Курчатовский институт»,

г. Москва, 123182, пл. Академика Курчатова, д.1,

тел. +7 (499) 196-95-39

E-mail: nrcki@nrcki.ru