

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

**Диссертационный совет:** Д 212.125.14

**Соискатель:** Богданов Илья Олегович

**Тема диссертации:** Двухмасштабное моделирование пространственных течений жидкостей и газов в пористых композитных структурах

**Специальность:** 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**Решение диссертационного совета по результатам защиты:** На заседании 19 октября 2018 года, протокол № 16, диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, и принял решение присудить Богданову Илье Олеговичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

**Присутствовали:** Красильников П.С. – *председатель*, Гидаспов В.Ю. – *ученый секретарь*, а также *члены диссертационного совета:* Холостова О.В., Бардин Б.С., Буров А.А., Колесник С.А., Косенко И.И., Котельников М.В., Никитченко Ю.А., Овчинников М.Ю., Ревизников Д.Л., Рябов П.Е., Формалев В.Ф., Ципенко А.В., Шамолин М.В..

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.14, к.ф.-м.н., доцент

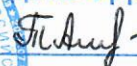


В.Ю. Гидаспов



И.о. начальника отдела УДС МАИ

Т.А. Анисина



ЗАКЛЮЧЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.14 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 19 октября 2018 г. № 16.

О присуждении Богданову Илье Олеговичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Двухмасштабное моделирование пространственных течений жидкостей и газов в пористых композитных структурах» по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите «12» июля 2018 года, протокол № 5, диссертационным советом Д 212.125.14 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерство образования и науки РФ, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, приказы Минобрнауки РФ: о создании диссертационного совета № 714/нк от 02.11.2012.

Соискатель Богданов Илья Олегович 1991 года рождения, окончил в 2015 году Аэрокосмический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по специальности «Прикладная математика».

С 07.2015 по настоящее время является аспирантом Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Работает в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный

технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) в должности инженера в Научно-образовательном центре «Суперкомпьютерное инженерное моделирование и разработка программных комплексов» (НОЦ «СИМПЛЕКС») с 2014 г. по настоящее время и ассистентом кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» (ФН-11) (по совместительству) с 2015 г. по настоящее время.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) на кафедре «Вычислительная математика и математическая физика» (ФН-11).

Научный руководитель – заведующий кафедрой «Вычислительная математика и математическая физика» (ФН-11) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), доктор физико-математических наук, профессор Димитриенко Юрий Иванович.

#### **Официальные оппоненты:**

1. Кобельков Георгий Михайлович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вычислительная математика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

2. Борисов Виталий Евгеньевич, гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН).

Оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – Акционерное общество «Композит», Московская область, г. Королев, в своем положительном заключении, подписанном секретарем подсекции НТС Сергеевой Е.С., начальником отдела 0222, кандидатом физико-математических наук Вагиным В.П. и главным научным сотрудником, доктором технических наук, лауреатом государственной премии Кирилловым В.Н. и утвержденном заместителем генерального директора АО «Композит», кандидатом физико-математических наук Дворецким А.Э., указала, что диссертацию следует признать законченным научным исследованием, которое выполнено на высоком научном уровне и посвящено решению актуальной проблемы. Автореферат и публикации соискателя с достаточной полнотой и правильностью отражают содержание диссертации. Диссертация Богданова Ильи Олеговича соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Богданов Илья Олегович, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

На диссертацию поступили отзывы:

**Отзыв на диссертацию ведущей организации.**

Замечания по диссертации:

1. Учет влияния вязкости на протекание жидкой фазы через пористую структуру в физико-математической модели реализован введением малого параметра разложения в методе асимптотического осреднения, что исключает корректное описание некоторых практически важных случаев, когда пористость структуры композита при соответствующих распределениях давлений и температур становится непроницаемой. Эту практически интересную область в технологии LCM, а также других технологий с пропиткой каркаса композита со структурной пористостью представленная модель и ее программная реализация не охватывает.

2. В физико-механической модели не предусмотрен учет капиллярных эффектов и поверхностного натяжения, которые вносят существенные влияние на фильтрацию уже при размерах поперечного сечения пор порядка 10 мкм.

3. Прикладная ценность разработанных физико-математических моделей и их программной реализации существенно бы возросла при учете перечисленных замечаний, поэтому следует порекомендовать развить подход, разработанный в диссертационной работе, на более широкую область, обозначенную в п.п. 1, 2.

**Отзыв на диссертацию официального оппонента, д.ф.-м.н., профессора Кобелькова Георгия Михайловича.**

Замечания по диссертации:

1. Обычно в качестве аппроксимации в задачах гидро-газодинамики используют метод конечных объемов, который обеспечивает сохранение баланса на грани ячейки. Автор использует метод конечных элементов, который этим свойством не обладает. Впрочем, для рассматриваемых чисел Рейнольдса результат в итоге получается тем же самым.

2. Имеется небольшое количество опечаток.

**Отзыв на диссертацию официального оппонента, к.ф.-м.н. Борисова Виталия Евгеньевича.**

Замечания по диссертации:

1. Для численного решения несимметричных систем линейных алгебраических уравнений в работе используется один из итерационных методов крыловского типа BiCGStab (раздел 2.3). Хотелось бы обратить внимание автора, что обычно методы данного класса используются совместно с процедурой предобуславливания, существенно улучшающей сходимость алгоритмов, что позволяет сократить полное время расчета. Для конечномерных задач высокой сеточной размерности, типичной для современных приложений (сотни тысяч – миллионы уравнений), применение предобуславливания является просто необходимым.

2. В разделе 3.1.2 автором проведено тестирование программного комплекса с использованием единственной тестовой задачи. Следовало также провести сравнение с известными данными для других модельных пористых сред (в частности, можно было рассмотреть модельную пористую среду, состоящую из упаковки шаров или параллельных цилиндров, для которых применимо соотношение типа Козени-Кармана) или рассмотреть синтетические тесты.

3. На рисунках с результатами расчетов 3.3, 3.8–3.21 следовало более аккуратно отобразить легенду рисунков, сделав ее более информативной, поскольку в представленном виде она является трудноразличимой.

4. На рис. 3.26 помимо численных результатов представлены графики прогнозируемого времени заполнения пористой среды жидкостью. При этом в тексте работы не описан способ получения этих данных.

5. Автору следовало более подробно продемонстрировать преимущества разработанной обобщенной модели слабосжимаемой жидкости.

**На автореферат диссертации поступило 3 отзыва.**

**1. Начальник отделения «Центр прочности» Акционерного общества «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», зам. главного конструктора по прочности, к.т.н. Каледин Владимир Олегович.**

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. Постановка задачи фильтрации для случая обобщенной модели слабосжимаемой жидкости (7)–(8) не содержит граничных и начальных условий. Кроме того, следовало бы кратко отразить процедуру их получения.

2. В автореферате не отражены конкретные преимущества обобщенной модели слабосжимаемой жидкости перед классическими подходами.

**2. Первый заместитель Генерального директора АО «ВПК «НПО машиностроения»», к.ф.-м.н. Хромушкин Анатолий Васильевич.**

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. Было бы интересно знать, в силу каких предположений математическая формулировка задачи (система (1) на странице 8) не учитывает поверхностные взаимодействия трех фаз – твердого тела, жидкости и газа, поскольку влияние капиллярных сил на скорость фильтрации жидкой фазы в микропорах композиционного материала может оказаться существенным.

2. Не совсем понятно обоснование правомерности построений (3), принятых на странице 9, – введение малого параметра  $\kappa \rightarrow 0$  в безразмерные критерии Рейнольдса и Эйлера, поскольку, строго говоря, при использовании теоретических положений метода малого параметра необходимо определить и другие (в общем случае не геометрические) параметры  $\kappa_1 \ll 1$  и  $\kappa_2 \ll 1$ , отличные от  $\kappa$ .

**3. Начальник лаборатории «Прочность и надежность материалов воздушного судна» им. профессора С.И. Кишкиной ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр, к.т.н. Яковлев Николай Олегович.**

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. Как следует из автореферата, при решении макроскопической задачи о вытеснении газа из пористой среды требуется информация о форме межфазной поверхности. Для этого используется метод введения динамических независимых координат, в которых положение границы не изменяется. В тоже время следует отметить, что данный подход либо сложно реализуем, либо вовсе неприменим для случаев более сложной геометрии, содержащей, например, отверстия или вырезы.

2. Из автореферата не совсем ясна необходимость учета слабой сжимаемости жидкости.

**Выбор официальных оппонентов** обосновывается их компетентностью в области тем, затрагиваемых в диссертационном исследовании.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вычислительная математика» ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» Кобельков Георгий Михайлович – автор более 60 работ. Область научных интересов: численные методы решения задач математической физики, в частности, уравнений теории упругости, гидродинамики, эллиптических уравнений и т.д. Для уравнений Навье-Стокса вязкой несжимаемой жидкости в переменных «скорость-давление» им предложены математически обоснованные методы расчета; для краевых задач для эллиптических уравнений и уравнений теории упругости с сильно меняющимися коэффициентами предложены итерационные методы со скоростью сходимости не зависящей от разброса этих коэффициентов.

Официальный оппонент, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), Борисов Виталий Евгеньевич – автор более 30 работ. Область научных интересов: численные методы решения задач математической физики, исследования в области механики жидкости, газа и плазмы, теория фильтрации.

**Выбор ведущей организации** – АО «Композит» – обусловлен ее положением как одной из передовых организаций, проводящих исследования, эксперименты, разработку и производство композиционных материалов для различных применений. АО «Композит» является ведущим материаловедческим предприятием Федерального космического агентства



(статус подтверждён приказом Росавиакосмоса от 17 февраля 2003 года №75к).

Соискатель имеет 12 опубликованных научных работ по теме диссертации, из них 5 работ опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Большинство работ опубликовано в соавторстве, при этом вклад соискателя был определяющим, а опубликованные результаты получены либо лично соискателем, либо при его непосредственном участии. В опубликованных работах излагаются основные положения диссертационной работы: разработка физико-математической модели слабосжимаемой жидкости и системы уравнений ее пространственного течения в пористой среде совместно с газовой средой; применение метода асимптотического осреднения для моделирования пространственного течения слабосжимаемой жидкости, вытесняющей газовую среду в пористой композитной структуре; постановка локальных задач пространственного течения жидкости и газа на ячейке периодичности композитной структуры; разработка численного метода решения локальных задач в общей трехмерной постановке и алгоритма расчета тензора проницаемости; постановка глобальной задачи течения жидкости, вытесняющей газ из пористой среды; разработка численного метода решения глобальной задачи течения жидкости, вытесняющей газ из пористой среды; численное исследование локальных пространственных течений жидкости и газа на ячейке периодичности типовых композитных структур; численное исследование макроскопических течений жидкости, вытесняющей газовую среду в типовой пористой композитной структуре.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Димитриенко Ю.И., Богданов И.О. Конечно-элементный метод решения трехмерных задач теории устойчивости упругих конструкций //

Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 6(69). С. 73-92.

2. Димитриенко Ю.И., Богданов И.О. Многомасштабное моделирование процессов фильтрации в пористых средах // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 3(75). 19 с.

3. Димитриенко Ю.И., Богданов И.О. Многомасштабное моделирование процессов фильтрации жидкого связующего в композитных конструкциях, изготавливаемых методом RTM // Математическое моделирование и численные методы. 2017. № 2(14). С. 3–27.

4. Димитриенко Ю.И., Захарова Ю.В., Богданов И.О. Математическое и численное моделирование процесса фильтрации связующего в тканевом композите при RTM методе изготовления // Университетский научный журнал. 2016. №19. С. 33–43.

5. Димитриенко Ю.И., Шпакова Ю.В., Богданов И.О., Сборщиков С.В. Моделирование процесса многоуровневой фильтрации жидкого связующего в тканевом композите при RTM-методе изготовления // Инженерный журнал: Наука и инновации. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. № 12(48). 7 с.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **разработана** двухмасштабная модель пространственного течения слабосжимаемой жидкости, вытесняющей газовую среду в пористой композитной структуре;

– **сформулированы** локальные задачи пространственного течения слабосжимаемой жидкости и газа в ячейках периодичности и глобальная задача течения жидкости, вытесняющей газ из пористой композитной структуры;

– **показано**, что постановки локальных задач фильтрации газа и слабосжимаемой жидкости формально в точности совпадают и каждая из них представляет собой стационарную задачу течения некоторой фиктивной

линейно-вязкой несжимаемой среды, а их решение зависит только от внутренней геометрии пор;

– **сформулированы** вариационные постановки локальной и глобальной задач течения жидкой и газовой фаз, с помощью которых разработаны численные алгоритмы решения локальных и глобальных задач в общей трехмерной постановке;

– **получены** соотношения для численного расчета компонент тензора проницаемости пористой структуры без использования каких-либо предположений о характере локальных процессов фильтрации;

– **получены** результаты численного моделирования локальных пространственных течений жидкости и газа на ячейке периодичности типовых композитных структур, показавшие эффективность предложенного алгоритма решения локальных задач и вычисления тензора проницаемости пористых сред;

– **получены** результаты численного моделирования макроскопического течения жидкого связующего, вытесняющего газовую среду в типовой пористой композитной структуре, показавшие эффективность предложенного алгоритма решения задач для рассмотренной модели слабосжимаемой жидкости.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в следующем. Соискателем разработано программное обеспечение для двухмасштабного моделирования процессов фильтрации, реализующее предложенные в диссертации физико-математические модели и алгоритмы численного решения локальных и макроскопических задач.

В работе предложена методика двухмасштабного моделирования движения жидкостей и газов в пористых средах со сложной внутренней микроструктурой, представляющая интерес с точки зрения исследования технологических процессов при производстве композиционных материалов на основе пропитки армирующего материала наполнителя композита жидким связующим в оснастке. Данный подход использует асимптотический анализ

системы уравнений Навье-Стокса, что дает возможность избежать экспериментального исследования образцов с целью определения проницаемости, а также использования приближенных моделей для описания локальных процессов движения сред. Предложенная методика дает возможность непосредственно рассчитывать параметры пористой среды на основе численного решения локальных задач для конкретной модели геометрии микроструктуры пористой среды.

**Достоверность результатов исследования** базируется на использовании теоретически обоснованного математического аппарата, апробированных численных методов и фундаментальных законов механики сплошной среды. Адекватность ряда результатов в работе проверяется посредством сравнения с известными аналитическими решениями. Результаты диссертации отражены в рецензируемых журналах, в том числе, входящих в Перечень ВАК и доложены на всероссийских и международных конференциях.

**Личный вклад.** Все теоретические выкладки выполнены соискателем самостоятельно под руководством научного руководителя. Соискатель выполнил необходимые расчетно-теоретические исследования, на базе которых получены постановки локальных и макроскопических задач фильтрации и разработаны алгоритмы их численного решения. Соискатель выполнил разработку программного комплекса для двухмасштабного моделирования процессов течения жидкостей и газов в пористых средах со сложной внутренней микроструктурой. На основе разработанного программного обеспечения соискателем выполнен ряд вычислительных экспериментов по моделированию локальных и глобальных процессов пространственного течения, а также определению характеристик пористых композитных структур.

**Диссертация удовлетворяет пунктам 9-14 постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения ученых степеней»**, так как является самостоятельно выполненной, завершенной

научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи двухмасштабного моделирования пространственных течений жидкостей и газов в пористых композитных структурах.

На заседании «19» октября 2018 года диссертационный совет принял решение присудить Богданову И.О. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за 15, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета  
Д 212.125.14, д.ф.-м.н., профессор

П.С. Красильников

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.125.14, к.ф.-м.н., доцент

В.Ю. Гидаспов

И.о. начальника отдела УДС МАИ  
Т.А. Аникина

