

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 31.05.2017 протокол № 6

О присуждении Яковенко Ивану Сергеевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Режимы распространения пламени в химически активных газах и газовзвесьях» в виде рукописи по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника, принята к защите 20.03.2017г., протокол № 3, диссертационным советом Д 002.110.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр.2, jiht.ru, (495) 485-8345), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012г. № 105/нк.

Соискатель Яковенко Иван Сергеевич 1989 года рождения, в 2013 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

В 2017 году окончил очную аспирантуру МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, заведующий отделом №4.3 – вычислительной физики, Иванов Михаил Федорович, Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Объединенного института высоких температур Российской академии наук, НИЦ-4.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор, Головизнин Василий Михайлович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, отдел перспективных исследований и математического моделирования, заведующий отделом;

доктор физико-математических наук, Медведев Сергей Павлович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН), лаборатория гетерогенного горения, заведующий лабораторией.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (г. Москва), в своем положительном заключении, составленном и.о. начальника отделения 600 «Неравновесные физико-химические процессы в газовых потоках и элементах реактивных двигателей», кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником Копченовым В.И. (утвержденном научным руководителем-заместителем генерального директора Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» д.т.н. старшим научным сотрудником Ланшиным А.И.), отметила актуальность, научную новизну, достоверность результатов работы, научную и практическую значимость работы. По диссертации имеются следующие замечания:

1. При проведении трехмерных расчетов (см. главу 3) для стехиометрической водородно-кислородной смеси в канале предварительно моделировалось течение в канале меньшего поперечного сечения для трех разных случаев задания параметров в слое инициирования: воспламенение в слое без возмущения; регулярные малые возмущения поверхности нагретого слоя; случайные малые возмущения. Как следует из результатов, представленных на рисунке 3.1, топология поверхности фронта пламени различается существенно для трех рассмотренных случаев. Основной расчет для канала большего поперечного сечения проводился с заданием третьего типа условий (см. рисунок 3.3). В

диссертации на стр.51 содержится утверждение, что «динамика развития волны горения во всех трех случаях остается неизменной». Информации, иллюстрирующей это утверждение, к сожалению, в диссертации нет. Было бы полезно привести соответствующие данные, например, на рисунке 3.2 для динамики скорости и давления ведущей точки поверхности фронта пламени. Конечно, это связано с трудоемкими дополнительными расчетами. Но для канала меньшего поперечного сечения такие расчеты были выполнены, поэтому соответствующие результаты, иллюстрирующие вышеприведенное утверждение, могли бы быть представлены.

2. Следует отметить, что для анализа роли волн сжатия в развитии горения в канале (раздел 3.1.2 диссертации), использовался «метод движущихся источников энерговыделения конечного размера». Этот метод используется также при интерпретации результатов и в разделе диссертации 3.2. Было бы целесообразно дать в диссертации краткое описание этого метода анализа результатов трехмерных расчетов.

3. В диссертации в разделе 3.2 отмечается, что на завершающей стадии процесса ускорения пламени, предшествующего возникновению детонации, важную роль играет механизм, связанный с влиянием давления на время индукции водородно-кислородной смеси (см. обсуждение результатов на стр. 59, 60). В рассмотренном примере для анализируемых условий время индукции уменьшается с ростом давления. На рисунке 3.7 представлена соответствующая зависимость. В работе используются два реакционных механизма для окисления водорода. Возникает вопрос о влиянии кинетической модели на зависимость, представленную на рисунке 3.7. Этот вопрос важен и в связи с исследованиями, проведенными в разделе 3.2 диссертации.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в Объединенном Институте Высоких температур РАН, в Институте физической химии им. Н.Н. Семенова РАН, в Институте проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов, в Центральном институте авиационного моторостроения им. П.И. Баранова и во многих других научных и промышленных учреждениях.

Соискатель имеет 10 статей в реферируемых журналах (10 из них в журналах из списка ВАК), более 20 тезисов в сборниках трудов конференций:

Основные работы:

1. Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S., Liberman M.A. Hydrogen-oxygen flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in three-dimensional rectangular channels with no-slip walls // International Journal of Hydrogen Energy. – 2013. Vol. 38, no. 36. – Pp. 16427-16440
2. Голуб В.В., Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Яковенко И.С. О детонационно-индуцированной имплантации микрочастиц в подложку // Письма ЖТФ. – 2014. – Т. 40, №20. – С. 88-95.
3. Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S. The role of compression waves in flame acceleration and transition to detonation inside confined volumes // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 653 – P. 012062.
4. Efremov V.P., Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Direct initiation of gaseous detonation via radiative heating of microparticles volumetrically suspended in the gas // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 653. – P. 012061.
5. Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Modes of choked flame instability defined by the peculiarities of combustion kinetics at rising pressure // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 653. – P. 012061
6. Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Яковенко И.С. Влияние газодинамических процессов на развитие горения вблизи концентрационных пределов воспламенения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – Т. 6. – С. 85-98.
7. Ефремов В.П., Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Яковенко И.С. Объемное инициирование газовой детонации путем лучистого нагрева взвешенных в газе микрочастиц // Письма ЖТФ. – 2016. – Т. 42, №4. – С. 52-59.
8. V.P. Efremov, M.F. Ivanov, A.D. Kiverin, I.S. Yakovenko Mechanisms of direct detonation initiation via thermal explosion of radiatively heated gas-particles layer // Results in Physics. – 2015. – Vol. 5. – Pp. 290 – 296.
9. M.F. Ivanov, A.D. Kiverin, S.G. Pinevich, I.S. Yakovenko Application of dissipation-free numerical method CABARET for solving gas-dynamics of combustion and detonation // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 754. – P. 102003.
10. I.S. Yakovenko, A.D. Kiverin, S.G. Pinevich, M.F. Ivanov Role of numerical scheme choice on the results of mathematical modeling of combustion and detonation // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 774. – P. 012093

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (старший научный сотрудник, д.ф.-м.н., Фурсенко Роман Викторович) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Автор связывает формирование ансамбля отдельных очагов и многоочагового режима горения бедной водород-воздушной смеси в основном с влиянием естественной конвекции. В тоже время, известно, что влияние диффузионно-тепловой неустойчивости, проявляющейся при малых числах Льюиса, приводит к аналогичному поведению пламени и в условиях отсутствия гравитационных сил (W. Gerlinger et. Al. // Comb. Flame 2003). В связи с этим представляет интерес сравнительный анализ результатов, полученных в рамках моделей учитывающих и не учитывающих влияние сил гравитации.

- В главе VI указано, что условия численного эксперимента соответствуют данным экспериментальной работы (Berkowitz A.M. et. Al. // Proc. Comb. Inst., 2011). В тоже время, результаты сопоставления численных и экспериментальных данных в автореферате не приводятся и не обсуждаются.

2. ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (заведующий лабораторией “Волновых процессов в ультрадисперсных средах”, д.ф.-м.н. Федоров Александр Владимирович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Бедарев Игорь Александрович) – отзыв положительный, с замечаниями:

- При моделировании скоростной релаксации микрочастиц учитывается Стоксов закон сопротивления, который справедлив для низких скоростей обтекания. Однако за детонационными волнами скорости потока достигают значительных величин. Почему автор не использовал достаточно простые аппроксимации закона сопротивления от чисел Маха и Рейнольдса, имеющиеся в литературе?

- В работе утверждается, что при ускорении пламени поток сохраняет ламинарный характер вплоть до перехода к детонации. Не споря с этим утверждением, вызывает сомнения, что такой вывод можно сделать на основе данных расчетов. Прямое численное моделирование перехода к турбулентности требует шага расчетной сетки меньше масштаба самых мелких вихрей. Из автореферата неясно, достаточен ли шаг расчетной сетки для описания этого явления?

- Не пытался ли автор оценить уровень энергии инициирования в задаче о формировании детонации с помощью внешнего источника изучения и сравнить

эти значения с экспериментальными данными об энергии инициирования, доступными в литературе?

3. ФГБУН Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (Заведующий лабораторией, д.ф.-м.н., Ассовский Игорь Георгиевич) - отзыв положительный, с замечаниями:

- К недостатку автореферата можно отнести отсутствие в нем информации о границах областей применимости предложенных в диссертации теоретических моделей физико-химических процессов, а также сравнения полученного численного решения задачи о детонационной имплантации микронных частиц с результатами аналогичного физического эксперимента (Berkowitz A.M. et. al. // Proc. Comb. Inst., 2011) цитируемого в диссертации.

4. ФГБУН Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (Старший научный сотрудник, к.ф.-м.н. Тереза Анатолий Михайлович) - отзыв положительный, с замечаниями:

- Не проведен анализ полных кинетических механизмов воспламенения и горения водородно-воздушных смесей и обусловленность выбранного для численного моделирования кинетического механизма с учетом диапазонов температуры, давления и концентраций в исследуемых условиях.

- Недостаточно полно проведено сравнение результатов тестов водородно-кислородной стехиометрической смеси приведенное в таблице 1 главы 2. Известно, что экспериментальные значения измеряемой задержки воспламенения водородно-воздушных и водородно-кислородных смесей для разных экспериментальных условий сильно отличаются [Schonborn A, Sayad P., Konnov A.A. and Klingmann J 2014 Int. J. Hydrogen Energy 39 12166].

5. ФГБОУ ВО “Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)” (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (Заведующий лабораторией “Терагерцовая оптотехника”, к.ф.-м.н. Юрченко Станислав Олегович) - отзыв положительный, с замечаниями:

- На мой взгляд, автору следовало бы больше внимания обратить на поиск общих физических механизмов, управляющих переходом между различными скоростными режимами горения. Результаты работы позволяют сделать ряд общих выводов об условиях возникновения пульсаций давления и неустойчивости фронта, ведущей к его ускорению.

- Автореферат содержит ряд пунктуационных ошибок.

6. Тель-Авивский Университет (государственный институт) (к.т.н., PhD, научный сотрудник отдела точных наук, Каган Леонид Семенович) - отзыв положительный, с замечаниями:

- По результатам модельных расчетов автора метод КАБАРЕ даёт существенно лучшие результаты, чем ЭЛМ. Однако все физически значимые задачи выполнены с помощью ЭЛМ.

- Использование относительно полного набора физических факторов предполагает количественное сравнение результатов расчета и соответствующих экспериментов. Однако это сравнение отсутствует в работе.

7. Колледж инженерии и минеральных ресурсов Университета Западной Вирджинии (к.ф.-м.н., PhD, младший профессор кафедры машиностроения и аэрокосмоса, Аккерман Вячеслав Борисович) - отзыв положительный, с замечаниями:

- В четвертой главе автореферата (стр.12) упомянуты экспериментальные данные по воспламенению газозвеси при воздействии источника внешнего излучения, полученные в установке, аналогичной рассмотренной в диссертации. Однако, в тексте автореферата не указано, было ли проведено сравнение результатов моделирования с данным экспериментов и каков полученный результат, если сравнение проводилось.

- Аналогично на стр. 17 автореферата описана процедура адаптации численного метода КАБАРЕ для решения газодинамики реагирующих потоков и указано на проведение верификации данной методики на задаче о стационарном дозвуковом ламинарном распространении пламени. Однако, в тексте автореферата нет данных о сравнении результатов моделирования детонационных волн и сравнении получаемых результатов с параметрами Чепмена-Жуге.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- д.ф.-м.н., профессор Головизнин В.М. является ведущим ученым в области разработки алгоритмов вычислительной гидродинамики и математического моделирования сложных гидродинамических течений. Является автором более 200 статей по этой тематике. Основные публикации, связанные с тематикой диссертационной работы Яковенко И.С.:

1. D.G. Asfandiyarov, S.A. Finogenov, V.M. Goloviznin Parameter-free method for computing the turbulent flow in a plane channel in a wide range of Reynolds numbers // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2015. – Vol. 55, №9 – Pp. 1515-1526;

2. V.M. Goloviznin, S.A. Karabasov, V.G. Kondakov Generalization of the cabaret scheme to two-dimensional orthogonal computational grids // *Mathematical Models and Computer Simulations*. – 2014. – Vol. 6, №1 – Pp. 56-79;

3. В.Ю. Глотов, В.М. Головизнин Схема кабаре для двухмерной несжимаемой жидкости в переменных «скорость-давление» // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2013. – Т.25, №7. – С. 103-136.

- д.ф-м.н. Медведев С.П. является признанным специалистом в области экспериментальных и теоретических исследований процессов инициирования и нестационарного распространения волн горения в реагирующих газовых смесях. Основные публикации оппонента, связанные с тематикой диссертации.

1. С.В. Хомик, С.П. Медведев, А.А. Борисов, В.Н. Михалкин, О.Г. Максимова, В.А. Петухов, А.Ю. Долгобородов Распространение детонации по топливовоздушным смесям в плоских каналах // *Химическая физика*. – 2016. – Т. 35. № 4. – С. 48-56.

2. С.П. Медведев, С.В. Хомик, О.Г. Максимова, В.Н. Михалкин, В.А. Петухов, А.Ю. Долгобородов Воспламенение водорода высокого давления при его истечении в объём с препятствиями // *Технологии техносферной безопасности*. – 2015. – № 6 (64). – С. 38-45.

3. S.V. Khomik, B. Veyssiere, V. Montassier, S.P. Medvedev, G.L. Agafonov, M.V. Silnikov On some conditions for detonation initiation downstream of a perforated plate // *Shock Waves*. – 2013. – Vol. 23. № 3. – Pp. 207-211.

Выбор государственного научного центра Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ЦИАМ) в качестве ведущей организации обусловлен тем, что ЦИАМ является профильной организацией, специализирующейся на проведении исследований в области горения химически активных газовых смесей и их использования в качестве топлив для различных типов двигателей. В отделении «Неравновесные физико-химические процессы в газовых потоках и элементах реактивных двигателей» ведутся интенсивные теоретические исследования химической кинетики процессов воспламенения активных газовых смесей, механизмов и режимов распространения волн дефлаграционного горения и детонации, что близко к тематике диссертационного исследования соискателя. Среди основных публикаций сотрудников ЦИАМ, можно выделить следующие публикации, связанные с тематикой диссертации:

1. Д.А. Любимов, И.В. Потехина Исследование нестационарных режимов работы сверхзвукового воздухозаборника RANS/ILES-методом // Теплофизика высоких температур. – 2016. – Т. 54, №5. – С. 784-791
2. Starik A.M., Bezgin L.V., Kopchenov V.I., Loukhovitski B.I., Sharipov A.S., Titova N.S. Numerical study of the enhancement of combustion performance in a scramjet combustor due to injection of electric-dischargeactivated oxygen molecules // Plasma Sources Science and Technology. – 2013. – Vol. 22. №6. – Pp. 065007.
3. Bezgin L.V., Kopchenov V.I., Sharipov A.S., Titova N.S., Starik A.M. Evaluation of prediction ability of detailed reaction mechanisms in the combustion performance in hydrogen/air supersonic flows // Combustion Science and Technology. – 2013. – Vol. 185. №1. – Pp. 62-94.

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

- путем компьютерного моделирования процессов ускорения пламени и перехода к детонации в трехмерных полукрытых каналах подтверждена справедливость теории ускорения пламени и перехода к детонации, предложенной ранее на основе результатов двумерных расчетов.
- получено детальное описание сценария развития горения в бедных водород-воздушных смесях близких по составу к концентрационному пределу воспламенения, содержащихся в замкнутом объеме.
- методами численного моделирования обнаружен механизм локализованного инициирования детонации газообразной горючей смеси путем лучистого нагрева слоя взвешенных в газе нейтральных микрочастиц.
- получены оптимальные характеристики потока частиц и пространственного положения твердотельной подложки в процессе детонационной имплантации.
- проведена адаптация современного вычислительного метода КАБАРЕ для решения многомерных задач газовой динамики горения и детонации.
- разработан объектно-ориентированный программный комплекс для решения многомерных задач газодинамики реагирующих потоков на суперкомпьютерных вычислительных системах.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- впервые анализ процесса ускорения пламени и перехода к детонации методами численного моделирования был выполнен в трехмерной постановке с учетом детальных механизмов химической кинетики, что позволило уточнить детали механизма перехода к детонации;

- получена более полная, по сравнению с приводимой ранее в литературе, детализация процесса эволюции очага пламени вблизи нижнего концентрационного предела горения;
- показана принципиальная возможность инициирования направленной детонационной волны в газовой смеси путем лучистого нагрева взвешенных химически нейтральных микрочастиц.
- впервые методами математического моделирования воспроизведен процесс имплантации частиц на подложку в импульсе детонационной волны и получены оптимальные соотношения между характеристиками потока части и расположением подложки
- бездиссипативный балансно-характеристический метод КАБАРЕ был впервые адаптирован для решения задач распространения волн горения в химически активных газовых смесях

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

- проведен анализ особенностей горения бедных водородно-воздушных смесей, который позволил выделить и детализировать конвективный механизм переноса очагов возгорания, что дает дополнительный материал, необходимый для оценки возникновений и развития пожара в реакторном зале при тяжелых авариях на АЭС.
- получены результаты и модели горения газозвесей, которые позволяют оценить качественное и количественное влияние микрочастиц на развитие процессов горения горючей смеси и определить вклад теплового излучения в физические механизмы возгорания и инициирования детонации в газозвесах, что может быть использовано в прикладных задачах для контролируемого инициирования детонации с помощью излучения.
- получены оптимальные характеристики потока и пространственной ориентации подложки для обеспечения наибольшей эффективности процесса детонационной имплантации частиц, что может быть использовано для создания технических систем абразивной обработки и создания новейших композитных материалов.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в Объединенном Институте Высоких температур РАН, в Институте физической химии им. Н.Н. Семенова РАН, в Институте проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов, в Центральном

институте авиационного моторостроения им. П.И. Баранова и во многих других научных и промышленных учреждениях.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- достоверность выводов подтверждается использованием апробированных вычислительных алгоритмов и анализом результатов расчетов с привлечением достаточно ясных физических предположений.
- представлены результаты по всестороннему тестированию использованного эйлерово-лагранжева расчетного метода, которые показывают хорошее соответствие расчетных данных с результатами теоретических оценок и лабораторных экспериментов для самоподдерживающейся детонационной волны и ламинарного пламени;
- при решении задачи об ускорении фронта пламени и перехода к детонации в канале в трехмерной геометрии при построении расчетной сетки в полной мере учитывается опыт решения соответствующей двумерной задачи и тестирование численного метода с тем, чтобы разрешить структуру фронта пламени и зоны реакций;
- используемые численные методы для решения уравнений газовой динамики показали хорошее совпадение в области сходимости на тестовых задачах распространения волн горения и детонации с результатами, полученными с использованием более современного бездиссипативного метода КАБАРЕ;
- при моделировании получено качественное совпадение динамики ускорения пламени в канале и характерных стадий процесса ускорения пламени и перехода к детонации с получаемой в лабораторном эксперименте.

Личный вклад соискателя состоит в разработке автором подходов к программной реализации многомерного численного моделирования процессов распространения волн горения и детонации в газовых смесях и газозвесах на кластерных многопроцессорных и многоядерных системах, проведении большей части вычислительных экспериментов. Он принимал непосредственное участие в тестировании использованных компьютерных кодов, проводил модернизацию и усовершенствование вычислительного комплекса в соответствии с современными подходами разработки программного обеспечения, внедрял новые физические модели и математические алгоритмы. Принимал активное участие в анализе и интерпретации полученных результатов расчетов, а также в формулировке и обосновании моделей и выводов, вошедших в диссертацию.

Апробация результатов исследования проводилась на более чем 20 российских и международных конференциях и симпозиумах, в которых соискатель принимал личное участие. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены автором в соавторстве.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 31.05.2017г. диссертационный совет принял решение присудить Яковенко И.С. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 10 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 20, против 0, недействительных бюллетеней 1.

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02

д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02

к.ф.-м.н.

Васильев М.М.



31.05.2017г.