

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**СТЕНОГРАММА**

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданного на базе  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)  
от 27 декабря 2023 г. (протокол № 19)

Защита диссертации Добровольской Анастасии Сергеевны  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
«Использование неравновесной плазмы стримерного разряда для управления горением  
углеводородо-воздушной смеси в компрессионном двигателе»  
Специальность 1.3.9 – физика плазмы

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (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).

Протокол № 19 от 27 декабря 2023 г.

Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 27 человек, из них 12 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 12 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – председатель диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) д.ф.-м.н., профессор, академик РАН Петров Олег Фёдорович

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) к.ф.-м.н. Тимофеев Алексей Владимирович

1.	Петров О.Ф.	д.ф.-м.н., проф., академик РАН	1.3.9, техн. науки	Присутствует
2.	Андреев Н.Е.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, физ.-мат. науки	Подключен
3.	Храпак А.Г.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
4.	Тимофеев А.В.	к.ф.-м.н.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
5.	Агранат М.Б.	д.ф.-м.н.	1.3.14, техн. науки	Отсутствует
6.	Амиров Р.Х.	д.ф.-м.н., ст.н.с.	1.3.9, физ.-мат.науки	Подключен
7.	Беляев И.А.	к.т.н.,	1.3.14, техн. науки	Присутствует
8.	Вараксин А.Ю.	чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф.,	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
9.	Васильев М.М.	д.ф.-м.н.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
10.	Васильев М.Н.	д.т.н., проф.	1.3.14, техн. науки	Присутствует
11.	Василяк Л.М.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
12.	Гавриков А.В.	д.ф.-м.н., доцент	1.3.9, техн. науки	Присутствует
13.	Голуб В.В.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.14, техн. науки	Присутствует
14.	Грязнов В.К.	д.ф.-м.н.	1.3.14, физ.-мат.науки	Подключен
15.	Дьячков Л.Г.	д.ф.-м.н.,	1.3.9, техн. науки	Присутствует
16.	Еремин А.В.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.14,	Присутствует

			физ.-мат.науки	
17.	Зейгарник Ю.А.	д.т.н., старший научный сотрудник	1.3.14, техн. науки	Отсутствует
18.	Зеленер Б.Б.	д.ф.-м.н.,	1.3.9, техн. науки	Присутствует
19.	Зобнин А.В.	д.ф.-м.н.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
20.	Иосилевский И.Л.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
21.	Киверин А.Д.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
22.	Лагарьков А.Н.	д.ф.-м.н., проф., академик РАН	1.3.9, физ.-мат.науки	Отсутствует
23.	Левашов П.Р.	д.ф.-м.н.	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
24.	Ломоносов И.В.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.14, техн. науки	Подключен
25.	Медин С.А.	д.т.н., проф.	1.3.14, техн. науки	Подключен
26.	Норман Г.Э.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
27.	Пикуз С.А.	к.ф.-м.н.	1.3.9, физ.-мат.науки	Подключен
28.	Савватимский А.И.	д.т.н.	1.3.14, техн. науки	Подключен
29.	Стегайлов В.В.	д.ф.-м.н.	1.3.9, физ.-мат.науки	Отсутствует
30.	Филиппов А.В.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
31.	Яньков Г.Г.	д.т.н., старший научный сотрудник	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует

## ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации научного сотрудника лаборатории 21.1 – численного моделирования магнитоплазменной аэродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) Князева Дмитрия Владимировича на тему «Использование неравновесной плазмы стримерного разряда для управления горением углеводородо-воздушной смеси в компрессионном двигателе». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы. Диссертация выполнена в лаборатории 21.1 – численного моделирования магнитоплазменной аэродинамики ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, [jiht.ru](http://jiht.ru)).

Научный руководитель:

Битюрин Валентин Анатольевич – д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории 21.1 – численного моделирования магнитоплазменной аэродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

Официальные оппоненты:

Тупикин Андрей Викторович - гражданин РФ, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории физических основ энергетических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, тел.: (383) 333-1095, [itp.nsc.ru](http://itp.nsc.ru), e-mail: [tupikin@itp.nsc.ru](mailto:tupikin@itp.nsc.ru)).

Кочетов Игорь Валерианович – гражданин РФ, к.ф.-м.н., Ведущий научный сотрудник лаборатории физики плазмы Отделения теоретической физики, вычислительной математики и прикладных разработок Акционерного общества "Государственного научного центра Российской Федерации Троицкого института инновационных и термоядерных исследований" (108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, тел. (495) 841-5309, [triniti.ru](http://triniti.ru), e-mail: [kochet@triniti.ru](mailto:kochet@triniti.ru)).

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, тел.: (495)408-57-00, [mipt.ru](http://mipt.ru), e mail: [info@mipt.ru](mailto:info@mipt.ru))

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., старший научный сотрудник Тупикин А.В. (дистанционно) и к.ф.-м.н. Кочетов И.В.

## СТЕНОГРАММА

### Председатель

Итак, начинаем нашу работу. Кворум у нас есть, все необходимые процедурные моменты соблюдены.

Слово предоставляется ученому секретарю. Пожалуйста.

### Ученый секретарь

Дорогие коллеги! Традиционно напоминаю некоторые организационные моменты. Вопросы и выступления у нас производятся с использованием микрофона по центру. Оппоненты, научный руководитель выступают на трибуне там же, где и соискатель. Кроме того, по окончании, голосование будет проводиться с использованием телекоммуникационных систем, то есть на сайте института. Просьба проверить авторизацию, чтобы голосование провести в оперативном режиме. И далее переходим к делу. В наш диссертационный совет обратилась Добровольская Анастасия Сергеевна, научный сотрудник лаборатории 21.1, с просьбой принять к защите диссертацию «Использование неравновесной плазмы стримерного разряда для управления горением углеводородо-воздушной смеси в компрессионном двигателе» по специальности 1.3.9 – физика плазмы. Добровольская Анастасия Сергеевна, 1987 года рождения, окончила магистратуру МФТИ в 2010 году.

Диссертационная работа была выполнена в ОИВТ РАН. Окончила аспирантуру ОИВТ РАН. Для предварительного рассмотрения была избрана комиссия диссертационного совета в составе заведующего лабораторией № 19 доктора физмат наук профессора Александра Викторовича Еремина, доктора физмат наук Алексея Дмитриевича Киверина, и главного научного сотрудника лаборатории № 20, доктора физмат наук, профессора, Станислава Александровича Медина. Экспертная комиссия дала заключение о соответствии работы тематике диссертационного совета и о возможности ее защиты в нашем диссертационном совете. Диссертация принята к защите. 26 октября 2023 года. В диссертационном деле имеются все необходимые документы. С вашего позволения, зачитывать все документы не буду. Если есть вопросы по документам, готов ответить.

### Председатель

Уважаемые коллеги, мы можем переходить теперь к заслушиванию диссертации? Коллеги, я прошу всех занять места. Анастасия Сергеевна, вам слово предоставляется, пожалуйста.

### Добровольская А.С.

*Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Добровольской А.С. имеется в деле).*

### Председатель

Анастасия Сергеевна, спасибо вам. Теперь мы переходим к вопросам, которые можно задать соискателю. Пожалуйста кто хотел бы это сделать. Пожалуйста.

### Еремин А.В.

Анастасия Сергеевна, в третьей главе вы рассказывали о влиянии длительности разряда на количество энергии, вкладываемой в радикалы. Ну это естественная такая зависимость, но это было приведено для одной атмосферы, как я заметил, и значит, первый вопрос: меньше чем 10 наносекунд также будет эта зависимость продолжаться? И вторая часть

вопроса: как это будет выглядеть в компрессионном двигателе, где не одна атмосфера? Я, может быть, что-то упустил. Вы там не варьировали длительность разряда.

**Добровольская А.С.**

Да, там, где я варьировала длительность разряда, у меня одна атмосфера. Но я сейчас чуть-чуть забегу вперед. Есть экспериментальные результаты, где варьировалась длительность разряда в двигателе, коронного, и более короткий разряд позволяет воспламенить смесь раньше при одинаковой мощности. Как раз это интересные результаты именно тем, что не одинаковая мощность, а одинаковый энерговыход 60 мДж. Здесь может быть одинаковый энерговыход и при этом разная длительность 80 нс и 25 нс, и 80 нс на самом деле уже гораздо ближе к искре, а 25 нс загораются пораньше и выделяется больше тепла. Здесь 14 атмосфер, если я не ошибаюсь. Единственное, скорее всего, здесь не бедная смесь, потому что сравнение с искрой для бедной смеси провести бывает довольно тяжело или она не очень бедная.

**Еремин А.В.**

Спасибо. Ну вот смотрите.

**Добровольская А.С.**

А вы можете первую часть вопроса еще повторить.

**Еремин А.В.**

Первая часть вопроса именно такая: что вот у вас при одной атмосфере 10 нс. Так если это было бы при 14 атмосферах, вы понимаете, что все эти процессы столкновительные во много раз быстрее, да и, соответственно, эти 10 нс за 14 атмосфер, наверное, были бы эквивалентны гораздо более короткому разряду. Вот здесь у вас как бы несоответствие результатов, которые при одной атмосфере, и тому, что вы исследовали в компрессионном двигателе. Вот я хотел понять, какая связь значит, еще раз в компрессионном двигателе, сколько у вас была длительность разряда, что вы не варьировали?

**Добровольская А.С.**

Нет.

**Еремин А.В.**

Какая была длительность разряда?

**Добровольская А.С.**

Смотрите вот те результаты, которые я потом использую прямо непосредственно в расчетах для высоких давлений, это не совсем те результаты, где варьирует длительность. Здесь длительность не варьируется, но здесь, несмотря на то что это такая достаточно осредненная модель, здесь используется метод G-факторов, но здесь считаются G-факторы для разных давлений, то есть давление здесь учитывается.

**Еремин А.В.**

Ну разумеется. Спасибо.

**Добровольская А.С.**

Вы, скорее всего, правы. Действительно может быть, нужно более короткий разряд для того же эффекта, но надо изучать.

**Председатель**

Так пожалуйста, еще вопросы, да пожалуйста, Леонид Михайлович.

**Василяк Л.М.**

У меня 3 вопроса. Первый касается длины стримеров и занимаемого объема. Вы показали на слайде, что у вас 5 кВ амплитуда в одном из первых, а коэффициент сжатия — наверное, 8 или 10. Наверное, вы опирались на какие-то данные, что там действительно длина стримера будет такая, что он будет закрывать объема цилиндра. Ну и хотелось бы уточнить, что вот это такое 0.8 объема. Это куда длина стримера доходит. Потому что представить столько стримеров очень сложно.

**Добровольская А.С.**

Это доля объема активированной зоны, это не доля объема всей камеры сгорания, это на самом деле внутренний параметр модели именно активированной зоны. И тут я уточню сразу, что я ее на защиту не выношу.

**Василяк Л.М.**

То есть у вас там слайд был...

**Добровольская А.С.**

Во-первых, по поводу давлений: в экспериментах, на которые я опираюсь и на которые опираются мои коллеги, используется подстройка напряжения. И вот здесь приведены фотографии, где повышают напряжение и зажигают разряд при достаточно высоких давлениях и все еще обрабатывают им кубические сантиметры, а не миллиметры. То есть это все еще объемный поджиг.

**Василяк Л.М.**

Ну тогда просто уточните, какие вы напряженности поля брали, чтобы понятно было.

**Добровольская А.С.**

У нас приведенное поле около 100 с чем-то Тд.

**Василяк Л.М.**

Понятно. второй вопрос: вы потом размазывали полученную концентрацию по объёму как-то?

**Добровольская А.С.**

Да.

**Василяк Л.М.**

И третий вопрос: почему волна ионизации начинается из определённого места. Там как бы там концентрация выше или какие-то неоднородности?

**Добровольская А.С.**

Волна самовоспламенения?

**Василяк Л.М.**

Да. Ещё не горение, а волна самовоспламенения.

**Добровольская А.С.**

Всё, я поняла. Сейчас я уточню: вот вы имеете в виду когда у нас загорелась активированная зона.

*(показывает на слайде)* Это радиус, это время, тут загорелась активированная зона. Здесь идёт дефлаграционная волна, а потом возникает самовоспламенение. Здесь есть некоторая неоднородность, связанная с тем, что, во-первых, есть волны давления, во-вторых, около дефлаграционной волны горения газ немножко нагрет. Около стенки тоже нагрев получается выше и где первым достигаются необходимые условия, оттуда и идёт. В расчётах я видела разное, видела даже как две волны начинают идти не одновременно, но сталкиваются.

**Василяк Л.М.**

Спасибо

**Добровольская А.С.**

Пожалуйста

**Председатель**

Так пожалуйста ещё вопрос.

**Амиров Р.Х.**

Олег Фёдорович можно задать вопрос.

**Председатель**

Да пожалуйста.

**Амиров Р.Х.**

У меня вопрос: опять по стримерному разряду. Значит, одно из основных понятий, которые вы используете, это G-факторы. Чувствительны G-факторы вот разряда вот, скажем, атомарного кислорода для различных давлений и температур, потому что вы включаете разряд при разных условиях, а что с G-факторами происходит при этом? Понятен вопрос?

**Добровольская А.С.**

У G-факторов учитывалось изменение давления, там учитывается изменение плотности и они пересчитывались с учетом этого. Насколько они чувствительные...

**Амиров Р.Х.**

Нет, именно G-фактор. Это, скажем, какой-нибудь пример у вас есть? вот вы изменили давление, что произошло с g фактором для атомарного кислорода?

**Добровольская А.С.**

Ну смотрите, если я меняю давление, у меня в принципе меняются, концентрации, то есть в принципе да, g-факторы чувствительны к давлению, но это все учтено, если я правильно поняла ваш вопрос.

**Амиров Р.Х.**

Ну вот, как раз были работы Найдиса, которые показывают, что существуют правила подобия и вроде бы не настолько же факторы чувствительны, так сказать, к изменению параметров разряда, то есть вы придерживаетесь другой точки зрения?



**Добровольская А.С.**

Подобие есть, собственно, отношение концентрации частиц, которые нам нужны, к общей (показывает формулу на слайде), то есть там квадратный корень. Я не могу сказать, что при разных давлениях же факторы константа, они меняются, но это не порядки.

**Амиров Р.Х.**

Но вы это учитывали?

**Добровольская А.С.**

Да.

**Амиров Р.Х.**

Спасибо.

**Добровольская А.С.**

Пожалуйста.

**Председатель**

Пожалуйста.

**Киверин А.Д.**

Анастасия Сергеевна, вот несколько вопросов по вашему докладу. Первый вопрос: вы довольно интересную систему предлагаете зажигания, а какие вообще возможны еще конфигурации разряда использовать по объемному распределению, чтобы увеличить, к примеру, его пространство. У вас здесь была радиусом полсантиметра всего область активной зоны. Возможно ли другие системы использовать с большим радиусом.

**Добровольская А.С.**

Да, у меня сейчас может быть даже есть дополнительные слайды с картинками. У меня активированная зона всё-таки довольно модельная, потому что я решаю одномерную задачу. Да, я учитываю сжатие, но я не особо что-то могу сделать, кроме цилиндра. Сами по себе воспламенители есть разные. Есть один электрод, есть звезда из электродов. Несколько электродов, конечно, обрабатывают больше объём. Если я не ошибаюсь, исследуются, например, воспламенители не на объёмных, а на диэлектрических поверхностных разрядах, но я очень глубоко в них не углублялась. Есть разные системы они исследуются не только в научных институтах, а и в компаниях, которые занимаются прикладным двигателестроением. Я знаю что, Nissan исследует объёмное воспламенение, сейчас активно, я ссылаюсь на несколько их работ.

**Киверин А.Д.**

Еще вопрос именно по вашему разряду, насколько его можно использовать в других смесях горючих, вы показали здесь смесь бутана с пропаном. Возможно ли это использовать, допустим, для смеси водорода с метаном, возможно ли это использовать для более тяжелых.

**Добровольская А.С.**

Да, конечно, это можно использовать для смеси водорода с метаном. На самом деле у меня эксперимент, который которым я иллюстрирую в самом начале актуальность, он как раз такой: вот слева на картинке это метан, справа — это смесь водорода с метаном. Ну,

смесь водорода с метаном, конечно, от искры тоже горит, но и в случае коронного воспламенителя результаты...

**Киверин А.Д.**

Ну то есть это прямо такая же система, которую вы моделировали?

**Добровольская А.С.**

Да, здесь одинаковый воспламенитель.

**Киверин А.Д.**

Другой разряд или такой же, как вы моделируете?

**Добровольская А.С.**

У меня 5 МГц здесь 1 МГц. К сожалению, я не знаю, какая здесь длина импульса, они не приводят в статье.

**Киверин А.Д.**

Так и ещё один небольшой вопрос: вот вы где комментарии давали по поводу механизма распространения волны самовоспламенения подчеркнули, что это не есть детонация. Но здесь либо оговорились, либо нужно некое пояснение. Вы сказали, что она распространяется с дозвуковой скоростью, но если бы она распространялась дозвуковой, то она наоборот, была бы, волна давления.

**Добровольская А.С.**

Нет Конечно, это сверхзвуковая скорость, это фазовая волна с сверхзвуковой скоростью.

**Киверин А.Д.**

Хорошо.

**Добровольская А.С.**

Спасибо большое.

**Председатель**

Хорошо, спасибо. Так есть ли еще желающие задать вопросы? Пожалуйста, Михаил Михайлович.

**Васильев М.М.**

У меня короткий вопрос. Было два, но на один вы уже ответили про экспериментальную апробацию вашей методики и показали слайд. Второй вопрос о КПД, поскольку в самом начале вы нам рассказали, что повестка и актуальность этой задачи связана с в том числе экологическими проблемами использования этих обедненных смесей. Вопрос: как при этом будет выглядеть КПД двигателей, работающих на обедненных смесях, возможно, нам придется на обедненных смесях больше топлива сжигать для того, чтобы мы, грубо говоря, двигались той же скоростью?

**Добровольская А.С.**

Да, у двигателей на бедных смесях, конечно, падает мощность. Ну, мы сжигаем меньше топлива. КПД именно с точки зрения преобразования в работу энергии топлива он как раз больше за счет другого показателя адиабаты. И есть некоторая игра с тем, что мощность меньше за счет того, что топливо меньше, при этом большее количество этой мощности,

большее количество энергии переходит в работу, а с другой стороны, также меньше тепловые потери, потому что на бедных смесях более низкие температуры сгорания, а при более низких температурах сгорания и конвективные и кондуктивные тепловые потери на стенку ниже. Это разные факторы, и чтобы правильно ответить на ваш вопрос, нужно рассматривать конкретную установку и учитывать всё. И суть в том, чтобы балансировать все эти вещи.

**Председатель**

Еще вопрос мне сказали в режиме онлайн был задан, пожалуйста, его можно.

**Яньков Г.Г.**

Олег Фёдорович, это Яньков Георгий. Меня слышно?

**Председатель**

Да, слышно прекрасно, пожалуйста.

**Яньков Г.Г.**

Спасибо. Анастасия Сергеевна, 17 слайд очень быстро проскочил. Там были уравнения и буквально два слова сказано о какой-то программе, не могли бы вы всё-таки хоть чуть-чуть про программу сказать: это ваша собственная разработка, либо это какой-то полукommerческий код?

**Добровольская А.С.**

Я модифицировал наш лабораторный даже, наверное, не лабораторный, а отделский программный код, который в литературе известен под именем Plasmaero, разработки Алексея Николаевича Бочарова, он - основной автор, и я вносила туда изменения в соответствии с моделью, чтобы можно было учитывать сжатие в такой квазиодномерной модели.

**Яньков Г.Г.**

Понятно спасибо.

**Добровольская А.С.**

Пожалуйста.

**Председатель**

Так есть ли еще вопросы, в том числе в режиме онлайн? Нет? Хорошо, коллеги Ну, вопросы были достаточно обширные и разнообразные. Мы переходим к следующему пункту, и здесь слово должно быть предоставлено научному руководителю Валентину Анатольевичу Битюрину. К сожалению, по весьма веским обстоятельствам он не смог сегодня присутствовать, поэтому, следуя регламенту, отзыв научного руководителя зачитает Алексей Владимирович.

**Ученый секретарь**

*Зачитывание отзыва научного руководителя не стенографируется.  
Положительный отзыв Битюрина В.А. имеется в деле.*

**Председатель**

Уважаемые коллеги, есть ли вопросы, если нет, тогда мы движемся дальше. Слово снова предоставляет Алексею Владимировичу, пожалуйста.

### Ученый секретарь

Коллеги, в деле имеется заключение Объединенного института высоких температур, в котором выполнялась работа. Если позволите, в этом заключении и в дальнейших отзывах я пропущу подробное описание работы, слова соблюдения требований, буду переходить только к сути, так как работу мы уже слушали и по ней вопросы задавали. В заключении организации Объединенного института высоких температур сказано, что данная диссертация Добровольской Анастасии Сергеевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физмат наук по специальности 1.3.9. физико-плазмы, рекомендуются оппоненты и ведущая организация, которые и приведены в деле. Заключение подписано председателем семинара академиком РАН Олегом Федоровичем Петровым.

Также в деле имеется отзыв ведущей организации Московского физико-технического института. Опять же пропущу подробное описание работы и перейду непосредственно к замечаниям. Имеется 3 замечания. По тексту диссертационной работы можно выделить следующие замечания. Первое: моделирование влияния разряда на процессы в камере сгорания выполнено в двумерной осесимметричной постановке. Из текста диссертации не ясно, в каком месте камеры сгорания расположены электроды, соответствующие такой постановке. Второе: требует пояснения вопрос о том, как соотносятся энерговклады от искрового разряда в стандартном процессе зажигания и в предлагаемом варианте инициированного зажигания импульсным высокочастотным разрядом. Третье: для лучшего понимания физического механизма воздействия рассматриваемого разряда на процесс зажигания стоит проиллюстрировать, как и на каком этапе происходит воздействие наработанных радикалов на основную кинетическую цепочку процесса зажигания.

Приведенные замечания не затрагивают основных результатов работы, выполненной на высоком научном уровне. Диссертация Добровольской Анастасии Сергеевны представляет собой законченную научную исследовательскую работу, посвященную актуальной тематике, соответствует требованиям пункта 9 положения о присуждении ученых степеней, а Добровольская Анастасия Сергеевна заслуживает присуждение ученой степени кандидата физмат наук по специальности 1 3 9 «физика плазмы». Вот эту последнюю часть о соответствии положению и о том, что заслуживает присуждение ученых степеней, если позволите, в дальнейших отзывах тоже буду пропускать, она повторяется. Дальнейшие отзывы тоже положительные. Отзыв подписан доктором физмат наук, профессором, заместителем заведующего кафедры прикладной физики Николаем Леонидовичем Александровым и утвержден проректором по научной работе мфти Виталием Анатольевичем Баганом.

Кроме того, было получено 3 отзыва на автореферат, все положительные.

**(Первый отзыв)** Первый отзыв получен от ведущего научного сотрудника Института теоретической прикладной механики имени Христиановича из Сибирского отделения РАН, доктора физмат наук Вадима Николаевича Зудова. Отзыв положительный, без замечаний.

**(Второй отзыв)** Второй отзыв получен от Ирины Александровны Знаменской, доктора физмат наук, профессора МГУ, и от Ирины Владимировны Мурсенковой, кандидата физмат наук, доцента кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета МГУ имени Ломоносова, отзыв положительный. Есть замечание: в качестве недостатка работы следует отметить, что следовало бы

проанализировать различия в применении плазмы наносекундных стримерных разрядов и пространственно-однородных разрядов на горение углеводородовоздушных смесей с точки зрения кинетических и газодинамических процессов в камере сгорания. Это единственное замечание.

**(Третий отзыв)** Следующий отзыв был получен от кандидата физмат наук, заместителя руководителя отделения плазменных технологий Бориса Васильевича Потапкина. Это Курчатовский институт. Отзыв положительный, замечаний нет. На этом отзывы завершены.

**Председатель**

Спасибо, Анастасия Сергеевна вам слово для ответа на замечания.

**Добровольская А.С.**

Сначала про моделирование разряда в двумерной осесимметричной постановке. Моделирование разряда в осесимметричной постановке — это не постановка из цилиндра двигателя. Эта постановка была сделана, чтобы посмотреть исключительно на временные характеристики образования атомов кислорода в двигателе. Вот я привела картинки из других работ, в том числе экспериментальных. Здесь цилиндр двигателя лежит на боку, вот, например, здесь это верх, это вот поршень, это вот электрод. И в качестве «земли» обычно выступает поршень или если конструкция наоборот сделана, в качестве «земли» может выступать крышка цилиндра. В общем, в цилиндре не «острие-острие», а электрод или несколько электродов, вокруг которых развивается разряд. И дальше земляной электрод. В качестве земляного электрода поршень или стенки.

**Председатель**

Ответ дан.

**Добровольская А.С.**

Я очень извиняюсь, кажется, у меня сохранилась не последняя версия презентации. Требуется пояснение о том, как соотносятся энерговыкладки от искрового разряда в стандартном процессе зажигания и в предлагаемом варианте инициирования зажигания импульсным высокочастотным разрядом. Насколько я понимаю по работам двигателистов, полный энерговыклад в газ в стримерном разряде и в современной свече сравнимы. Это десятки-сотни мДж. Но при этом, во-первых, свеча обрабатывает маленький объем, и поэтому для бедных смесей она не очень годится. А во-вторых, такой вот коронный разряд энергетически более выгоден, в нем гораздо больше энергии из электрической цепи переходит в газ, чем в искре. В искре достаточно много потерь на электродах и так далее. Ответ дан?

**Председатель**

Да, пожалуйста.

**Добровольская А.С.**

«Для лучшего понимания физического механизма воздействия рассматриваемого разряда на процесс зажигания стоит проиллюстрировать, как и на каком этапе происходит воздействие наработанных радикалов на основную кинетическую цепочку процесса зажигания». Самое яркое воздействие радикалов — это ускорение стадии холодного пламени. Стадия холодного пламени — это низкотемпературное тепловыделение до

основного воспламенения, то есть до стадии горячего пламени. И вот, обычно просто при самовоспламенении есть, допустим, вот такое начало окисления (*показывает на слайде*) и вот это вот достаточно медленные реакции при давлениях и температурах в двигателе. А вот дальше вариант цепи, один из вариантов. Он как раз приводит к постепенному повышению температуры, но из-за того, что радикалы пропила нарабатываются медленно, возникают долгие времена индукции и что делает разряд: кислород из разряда быстро начинает реагировать с топливом, до сотни наносекунд, образуется вот этот вот пропили и дальше пропили уже ускоряет очень сильно цепные реакции и, соответственно, включение разряда приводит к дополнительному тепловыделению на стадии холодного пламени и к последующему ускорению наступления стадии горячего пламени.

**Председатель**

Хорошо.

**Добровольская А.С.**

Замечание по автореферату. Я действительно очень извиняюсь, потому что у меня сохранена здесь последняя версия, а на компьютер попала не последняя. Но у меня есть дополнительные слайды.

**Председатель**

Ничего страшного, пожалуйста.

**Добровольская А.С.**

Вы не могли бы еще раз зачитать замечание по автореферату?

**Ученый секретарь**

Следовало бы проанализировать различия в применении плазмы наносекундных стримерных разрядов и пространственно однородных разрядов на горение углеводородовоздушных смесей с точки зрения кинетических и газодинамических процессов в камере сгорания.

**Добровольская А.С.**

Да, это справедливое замечание. Действительно очень интересно было бы провести такое сравнение. Я не останавливалась на однородных разрядах, потому что при высоких давлениях, то есть не при атмосфере, а 6 атмосфер или 12, уже нету однородного режима в характерных для двигателя температурах и давлениях. Есть стримерный режим или в дуговой режим, но стараются не допускать пробоя таких воспламенителей на стенку цилиндра. Но об однородных режимах речи уже не идёт, поэтому я их не рассматривала. Но да, это была бы действительно интересная задача, я согласна.

**Председатель**

На этом всё да? Анастасия Сергеевна, спасибо. Так теперь мы переходим к отзывам официальных оппонентов и слово предоставляется доктору физмат наук Андрею Викторовичу Тупикину Институт теплофизики Сибирского отделения РАН. Как я понимаю, Андрей Викторович дистанционно будет участвовать в нашем заседании.

**Тупикин А.В.**

Добрый день, уважаемые коллеги, поздравляю с наступающими праздниками. Надеюсь, меня слышно?

### **Председатель**

Прекрасно слышно.

*Оппонент зачитывает отзыв. Выступление оппонента не стенографируется.  
Положительный отзыв Тупикина А.В. имеется в деле.*

### **Тупикин А.В.**

Таким образом, диссертация Добровольской А.С. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований создана адекватная математическая модель, учитывающая все стадии тепловыделения в рабочем процессе компрессионного двигателя с плазменной активацией топливно-воздушной смеси. Диссертационная работа Добровольской А.С. удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и соответствует требованиям пункта Положения о порядке присуждения ученых степеней No 842 от 24.09.2013 г., а Добровольская А.С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы. Спасибо.

### **Председатель**

Так, Андрей Викторович, спасибо Вам, теперь слово предоставляется Анастасии Сергеевне для ответа оппоненту, пожалуйста.

### **Добровольская А.С.**

По поводу первого замечания: действительно там, конечно же, опечатка, вы правы. "На единицу массы" нужно убрать и действительно, да, это нигде особо дальше не используется. По поводу модели Хохенберга: опечатка - да, спасибо. "Почему вы считаете, что константы, полученные для рабочего процесса в дизельном двигателе, подходят и для компрессионного двигателя внутреннего сгорания?" Я опираюсь на расчетные работы, где оценивались как раз вот такие вот модели теплопереноса Хохенберга, Асаниса и третья, еще одна какая-то, к сожалению, забыла, и сравнивались как раз с экспериментальными значениями для компрессионного двигателя. Здесь у меня проведено давление, в работе сравнивалось давление, тепловыделение, температуры и модель Хохенберга неожиданно достаточно адекватно описывает процесс в компрессионном двигателе. Там не объясняется, почему, но, на мой взгляд, это может быть связано с тем, что до момента самовоспламенения у нас мало потерь, так как газ еще довольно холодный, а после самовоспламенения у нас, конечно, неизбежно появляются конвективные потоки. Потому что в реальном двигателе самовоспламенение, скорее всего, не будет однородным. Там будут горячие точки и будут волны самовоспламенения, и значит, в итоге продукты сгорания тоже будут конвективно отдавать тепло. На мой взгляд, это достаточное основание, чтобы в моей модельной задаче использовать модель Хохенберга. Ответ получен? Или сейчас только я говорю: ага, сейчас только я говорю, хорошо.

"По тексту встречаются упоминания о качественном сравнении с результатами других авторов: есть ли какие-то количественные экспериментальные данные по рабочему процессу компрессионного двигателя, с которыми можно корректно провести сравнение полученных вами результатов?" С количественным сравнением тяжело, потому что оно было бы, если бы я описывала какой-то конкретный эксперимент, прям не только мы берем такой воспламенитель, а те же самые параметры двигателя, те же составы. Тем не

менее в экспериментах получаются результаты, которые схожи с моими, например, есть результаты, о которых я сегодня уже говорила: более быстрое воспламенение для более короткого разряда при той же мощности. Есть результаты по ускорению распространения пламени, и там как раз сравнивалась корона в метане и в смеси метана с водородом с искровым разрядом. И вот здесь вот черная линия - это искровой, красная - корона. Скорость распространения пламени ускоряется и порядки в общем, те же, что и у меня. Ну а в бедной смеси от искры не получалось воспламенить, поэтому тут сравнить нельзя. То есть количественных экспериментальных данных для сравнения у меня нет, возможно, они когда-нибудь будут.

"В параграфе 4.3 идут рассуждения о скорости распространения пламени и сравнения с движением ламинарных фронтов по холодной смеси, неактивированной. Вы решаете уравнение Навье-Стокса, какие числа Рейнольдса в задаче? Распространение пламени идет в ламинарном или турбулентном режиме? Кроме того, подключая активацию среды, вы изменяете транспортные свойства, а скорость ламинарного пламени связана с коэффициентом теплопереноса. Чем же обусловлено ускорение волны горения на самом деле?" Давайте я начну с активации среды. Активация среды используется не по всему объёму цилиндра. То, что я называю разрядной активацией, используется в небольшом объёме на оси. Волна горения распространяется от этого объёма в необработанный газ, поэтому транспортные свойства там - на них никак активация не влияет. В задаче у нас ламинарные пламена, но программа Plasmaго в общем-то рассчитана только на ламинарные пламена, турбулентность в неё не включена. Рейнольдс в задаче несколько тысяч и действительно вы правы, в реальном двигателе стоит, если моделировать совсем правильно, стоит рассматривать возможность перехода в турбулентный режим. Тем не менее я рассматриваю довольно быстрый процесс распространения волны горения и взаимодействия ее с волнами давления и переход в самовосприимчивость после обработки разрядом и считаю, что полномасштабная турбулентность развиться не успевает. Вроде бы все. Следующий вопрос.

### **Тупикин А.В.**

Третий вопрос. Про химию.

### **Добровольская А.С.**

Да, вот он. "В тексте диссертации нет подробной кинетической схемы. В работе [83], на которую сделана ссылка, также не переводится в полной кинетике, но можем заметить, что в кинетической схеме отсутствуют реакции химиоинезации. Известно, что при горении углеводородных топлив за образование ионов в пламени отвечают реакции хемоинионизации. Как вы считаете, что изменится в вашем расчёте при включении этих реакций в кинетическую схему?" Если добавить реакции хемоинионизации в расчёт, то это приведёт к появлению не очень большого количества электронов около  $10^{-6}$  мольных долей в области высоких температур, фактически на фронте волны горения. Но разряд с этой областью никак не взаимодействует, т.к. обработка разрядом производится задолго до возникновения волны горения, и это фактически приведёт только к более точному химическому описанию происходящего на фронте волны горения. В том, что скорости волны горения и скорость самовоспламенения не изменятся сильно, я уверена, так как схема была оттестирована в том виде, в котором она есть, без реакции хемоинионизации и сравнена со скоростями ламинарного пламени. То есть описание будет более точным и



существуют работы моей коллеги Елена Александровны и Коссова, где описывается как раз хемоионизация в метановых пламенах. И там действительно получаются такие результаты, но у меня этого нет и принципиально ничего не изменится, а детальность повысится. Кажется, все вопросы.

**Председатель**

Да. Так есть ли ещё замечания, на которые ответа не было. По-моему, по всему списку. Спасибо все.

**Тупикин А.В.**

Хорошо.

**Председатель**

Спасибо вам. Так мы переходим к следующему пункту: слово предоставляется официальному оппоненту Игою Валерьяновичу Кочетову, кандидату физмат наук ГНЦ Тринити, пожалуйста, Игорь Валерьянович.

**Кочетов И.В.**

Добрый день, уважаемые коллеги, с наступающим вас всех Новым годом, в том числе и диссертанку. Значит, я хотел сказать своими словами, будет еще покороче. Ну вот, ясно, что мы хотим сделать двигатель, который будет более экономичный, более мощный, работать на меньшем количестве топлива с бедными смесями. При этом возникают проблемы, например, потеря устойчивости работы двигателя. Как способ решения этой проблемы — организация разряда. На что мы надеемся - что есть низкотемпературная плазма. У низкотемпературной плазмы температура электронов сильно оторвана от температуры ионов и нейтралов, поэтому мы можем создать сверхравновесную концентрацию атомов, радикалов, и в своей диссертации Анастасия Сергеевна показала, что основным каналом, который ускоряет химреакции, являются атомы кислорода. Да, конечно, можно написать полную схему, где было бы многомерное уравнение для разряда, которое описывает разряд, сложную химическую кинетику и трехмерную газодинамику. Но на современном уровне развития вычислительной техники такую задачу вряд ли можно решить и быстро и разумно проанализировать. Поэтому диссертантка решила эту проблему как: она взяла некоторые приближения по разным частям этой задачи, а именно для разряда. Она взяла приближение G-факторов, взяла достаточно полную химическую кинетику, в которой, естественно, учитывается, как скорость химреакции будет зависеть от давления. Поэтому зависимость от давления в этой части учитывается более полно. И взяла газовую динамику в квази-одномерном 1D приближении, "квази" означает, что у нас есть еще поршень, который сжимает порцию топливовоздушной смеси, и поэтому появляются дополнительные члены в уравнении газовой динамики. Диссертантка опробовала отдельные части своей задачи: а именно были выполнены сравнения по времени индукции топливно-воздушных разных смесей, по скорости распространения пламени. Были приведены графики, где хорошее согласие между известными опубликованными в литературе экспериментальными данными и то, что получается по кинетической схеме, которую использовала диссертантка. В этом смысле данные, которые получены в диссертации, подтверждают их достоверность. Из замечаний я хочу сказать следующее, что использование плазмы приводит к образованию атомов O, которые полезны. Но использование плазмы, так как у нас двигатель работает

на воздухе и есть азот, приводит к диссоциации азота, а стало быть, образованию атомов NOx. Известно, что в газовых турбинах на метане, которые работают, естественно, на воздухе, использование разряда привело к стабилизации работы турбины, особенно при бедном топливах, когда мало метана, но также привело к недопустимо большому выбросу окислов азота. Поэтому мне кажется, что диссертантка недостаточно полно отразила, сколько образуется окислов азота, и не привела данные в диссертацию, хотя в модель процессы диссоциации азота электронами включены. Второе замечание у меня относится к тому, что в качестве управляющих параметров в разряде диссертанткой предложены 3 вещи: это энергозатраты в разряде, длина стримера и время включения импульсного разряда относительно верхней мёртвой точки. Возникает вопрос, как первые два параметра, насколько они являются независимыми, потому что, увеличивая энергозатраты в разряде, можно прийти к тому, что увеличивается длина стримера, и в диссертации это не обсуждается. И третье замечание: есть отдельные помарки в диссертации, опечатки, но все причисленные мной замечания, не умаляют достоинства диссертации. В опубликованных статьях материалы о диссертации и в автореферате отражены полно. Диссертация соответствует всем требованиям ВАК, предъявляем к кандидатской диссертации, а ее автор Добровольская Анастасия Сергеевна заслуживает присуждение ученой степени кандидата физмат наук по специальности 1.3.9 физика плазмы. Спасибо за внимание.

#### **Председатель**

Вам спасибо. Так, Анастасия Сергеевна, вам слово для ответа на замечание.

#### **Добровольская А.С.**

«Однако, в диссертации не приводится значение расчетных концентраций NOX». Да, это справедливое замечание. Мне действительно стоило подробно расписать, что происходит с NOX в рассматриваемых расчетах. Но здесь я приведу результаты работы, которая тоже упоминается в диссертации, где специально было уделено внимание наработке нетермических оксидов азота в разряде и было показано, что в используемом нами диапазоне энергозатрат чем меньше энергозатраты тем меньше оксида азота. И при этом, при при максимально использованном энергозатраты в зависимости от момента включения количество оксидов азота достигает в самом максимальном случае несколько десятков ppm — это допустимые значения, а оптимально - чем раньше включаем, тем меньше количество оксидов азота в выхлопе. И при этом стехиометрическая смесь при тех же условиях даст тысячи ppm. Да, это справедливый вопрос. Мне следовало его рассмотреть и подробно уделить ему внимание в диссертации. Но вот в наших системах с азотом в целом все в порядке. Возможно, в турбинах были больше энергозатраты или, может быть, там как-то еще был устроен процесс.

«Предлагается управлять процессом воспламенения путем настройки трех параметров. Возникает вопрос: насколько независимыми являются первые 2 параметра: удельная энергия и доля объема, занимаемого стримерами?» Смотрите, физически, конечно, длина стримеров и насколько распухают каналы стримеров определяется энергозатраты, но здесь доля объема — это достаточно модельная величина, и можно зафиксировать удельный энергозатраты и полную энергию и варьировать долю объема независимо. Собственно, в презентации этого нет, а в диссертации есть результаты такого

исследования, когда я фиксирую энерговыклад, варьирую долю объема и, например, делаю это при разных энерговыкладах.

«К сожалению, текст диссертаций не свободен от опечаток и неточностей.» Да, действительно, большое спасибо. «Например, на странице 82 есть ссылка на рисунок 4», ссылка на рисунок 4 должна быть ссылкой на рисунок 3.19, стрелки на рисунке 3.8 я поставила в презентации, емкостной разряд - не очень удачная формулировка. Имеется в виду начальная стадия до перезамыкания, мне следовало написать "емкостная стадия". Мне кажется, ваши замечания кончились. Хорошо. Ответ получен, да?

#### **Председатель**

Если оппонент так считает, то вопросов не должно быть. Хорошо. Спасибо, Анастасия Сергеевна. Теперь мы переходим к дискуссии. Пожалуйста, кто хотел бы выступить, высказаться, пожалуйста, в режиме онлайн тоже. Леонид Михайлович, пожалуйста.

#### **Василяк Л.М.**

Уважаемые коллеги, заслушанная работа выполнена на очень интересную тему, которая несомненно важна для практики и интересно сделана. Полученные результаты, с моей точки зрения, не вызывают сомнений в том, что они сделаны правильно и они интересны, и могут быть применены. Я предлагаю данную работу поддержать и присудить искомую степень.

#### **Председатель**

Спасибо. Так, да пожалуйста.

#### **Филимонова Е.А.**

Добрый день, уважаемые коллеги, я хотела бы обратиться к вам с просьбой поддержать Анастасию, потому что мы начали с ней работать совсем недавно, не более пяти лет назад. Она резко поменяла тему своей деятельности, пошла фактически на риск, и мы за это время вместе смогли опубликовать хорошие работы в высокорейтинговых журналах, как в России, так и за рубежом. У нее очень хорошая работоспособность, она действительно предлагает оригинальные решения. И вот, например, задача, которую она рассказывала о влиянии волн давления или акустических волн, которые возникают при воспламенении активированной зоны на оси, она была перед ней поставлена, и она решила буквально за 2 месяца, и получился очень яркий результат, потому что влияние акустических колебаний на горение довольно-таки спорная задача, поскольку кто-то считает, что акустические волны не влияют, а кто-то говорит, что акустика влияет на горение. Однако все на самом деле, как в нашей задаче, связано с конкретным устройством в том устройстве, которое мы рассматриваем. Это прежде всего влияние давления от сжатия и давления от фронта распространяющейся волны горения на газ, который находится перед фронтом, между фронтом и стенкой. И вот Анастасия решила эту задачу самостоятельно, быстро и качественно. Быстро опубликовали результат, так что я считаю, что она уже стала квалифицированным специалистом, который может самостоятельно решать задачи. И я прошу ее поддержать.

#### **Председатель**

Спасибо. Так есть ли еще желающие высказаться? Так, пожалуйста.

#### **Киверин А.Д.**

Уважаемые коллеги, буквально тоже пару слов. Я тоже предлагаю поддержать эту работу. Она включает в себя довольно большой спектр очень требующих квалификаций аспектов, в том числе физики плазмы и физики горения. Анастасия Сергеевна, когда начинала этой работой заниматься, она в том числе и с нашей группой консультировалась по этим вопросам. Я думаю, что на сегодняшний день квалификация неоспорима, сама работа довольно интересная и полезная, как мне кажется.

#### **Председатель**

Так, спасибо. Есть ли ещё желающие, в том числе онлайн? По-моему, были очень убедительные комментарии и выступления. Я думаю, что ни у кого сомнений не осталось, если таковые и были. Так, тогда слово предоставляется по регламенту - заключительное слово соискателя, Анастасия Сергеевна, пожалуйста, а потом переходим к голосованию.

#### **Добровольская А.С.**

Да. Я хотела сказать, что это был долгий путь, и я очень рада здесь сегодня стоять и очень рада здесь сегодня рассказывать вам свою работу перед такой чудесной и квалифицированной аудиторией. Во-вторых, я тоже хочу сказать с наступающим Новым годом, меня все опередили, я отложила это напоследок. И, конечно, у меня очень много благодарностей. У меня огромная благодарность моей дорогой коллеге Елене Александровне Филимоновой, с которой мы вместе делали эту задачу. И я считаю, у нас получился очень такой синергетический эффект работы, когда мы дополняем друг друга и достигаем большего. Большое спасибо Алексею Николаевичу Бочарову, который руководит нами и который автор программы Plasmaго. Здесь, к сожалению, нет Валентина Анатольевича, но он очень много сделал для того, чтобы в моей голове появилось какое-то физическое понимание происходящих процессов. И у нас были очень долгие дискуссии на эту тему и о важности разряда для воспламенения, о важности неравновесности и других вещах. Огромное спасибо моим коллегам, на данные расчётов которых я опиралась - Николаю Александровичу Попову из МГУ и Георгию Вениаминовичу Найдису. Ну, спасибо моей семье и моему дорогому мужу, который меня поддерживал.

#### **Председатель**

Всё спасибо, Анастасия Сергеевна. Так теперь переходим к голосованию. Наверное, Алексею Владимировичу слово надо предоставить, он делает свои традиционные комментарии.

#### **Ученый секретарь**

Дорогие коллеги, наше заседание проводится в комбинированном очно-дистанционном режиме. Голосование проводится с использованием телекоммуникационных систем, то есть на сайте нашего института. Прошу всех членов диссертационного совета, присутствующих очно или дистанционно, войти под своим логином и паролем на сайт Института в раздел «диссовет-голосования» и проголосовать. Вы можете это сделать со своего устройства или с компьютера диссовета вот здесь вот на сцене.

*(Проводится процедура тайного голосования)*

#### **Председатель**

Уважаемые коллеги, я прошу всех заслушать результаты голосования. Алексей Владимирович, Вам слово.

**Ученый секретарь**

Дорогие коллеги, на заседании присутствовало 27 членов диссертационного совета, в том числе докторов наук по профилю, рассматриваемому в диссертации – 13, очно присутствовало 19 членов диссертационного совета, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой в диссертации – 10, онлайн присутствовало 8 членов диссертационного совета, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации – 3, получено 27 голосов, за — 27, против — 0. Недействительно 0.

**Председатель**

Очень хорошо. Нам нужно утвердить результаты голосования. Кто за, прошу поднять руки, если против — воздержавшиеся.

*(Протокол счетной комиссии утвержден единогласно)*

**Председатель**

**А вот теперь можно поздравить!**

*(Звучат аплодисменты)*

**Председатель**

Переходим теперь к проекту заключения.

*(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).*

Так, хорошо, есть ли ещё предложения, комментарии по заключению диссертационного совета? Если нет, тогда, уважаемые коллеги, мы должны проголосовать, принять за основу тот проект, что есть? Кто за, прошу поднять руки? Против, воздержавшихся нет.

*(Проект заключения принят единогласно).*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01  
(Д 002.110.02), СОЗДАННОГО 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 27.12.2023г. № 19  
О присуждении Добровольской Анастасии Сергеевне, гражданке Российской  
Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Использование неравновесной плазмы стримерного разряда для управления горением углеводородо-воздушной смеси в компрессионном двигателе» по специальности 1.3.9 – физика плазмы принята к защите 26.10.2023г., (протокол заседания № 14) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г.

Соискатель Добровольская Анастасия Сергеевна 1987 года рождения, в 2010 году окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Работает в должности научного сотрудника лаборатории № 21.1. – численного моделирования магнитоплазменной аэродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

В 2013 году окончила очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ОИВТ РАН Битюрин Валентин Анатольевич

Официальные оппоненты:

– доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических основ энергетических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики имени С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук Тупикин Андрей Викторович;

– кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики плазмы отделения теоретической физики, вычислительной математики и прикладных разработок Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» Кочетов Игорь Валерианович дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (г. Долгопрудный) в своем положительном заключении, составленном заместителем заведующего кафедрой прикладной физики, профессором, д.ф.-м.н. Александровым Николаем Леонидовичем указала, что научная значимость работы определяется в первую очередь новизной полученных результатов практически по всем направлениям работы. Например, установлены механизмы влияния разряда на все режимы горения в цилиндре камеры сгорания двигателя, возникающие после обработки части топливно-воздушной смеси разрядом. Интересны также результаты исследования влияния параметров разряда на воспламенение, варьируемые в широком диапазоне значений, которые демонстрируют возможность управлять временными характеристиками процессов горения в двигателе, для реализации оптимальных тепловых и мощностных характеристик двигателя.

Рассматриваемые в диссертации разрядные системы воспламенения не только активно изучаются в экспериментальных работах, но и используются на практике, что демонстрирует актуальность представленной работы.

Соискатель имеет 15 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 7 статей, изданных в рецензируемых периодических изданиях, входящих в базы данных Web of Science и Scopus и рекомендованных ВАК:

1. A.S. Dobrovolskaya, E.A. Filimonova, A.N. Bocharov, — «Numerical study of controlling a lean mixture autoignition in the hybrid HCCI engine using high frequency corona discharges». — в: Fuel 354 (2023), 129349
2. Е.А. Филимонова и А.С. Добровольская. — «Влияние момента инициации высокочастотного коронного разряда на развитие горения в компрессионном двигателе». — в: Теплофизика высоких температур 61.3 (2023), с. 1–10.
3. В.А. Битюрин, А.С. Добровольская, А.Н. Бочаров, А.А. Фирсов— «Образование атомарного кислорода в продольно-поперечном разряде» — в: Физика плазмы 49.5 (2023), с. 438–46.
4. Е.А. Филимонова, А.С. Добровольская — «Адаптация кинетической схемы к условиям горения этилена при температурах выше 1200 К» — в: Химическая физика 42.12 (2023), с. 1–9.
5. V.A. Bityurin, A.N. Bocharov, A.S. Dobrovolskaya, T.N. Kuznetsova, N.A. Popov, E.A. Filimonova — «Numerical Modeling of Pulse-Periodic Nanosecond Discharges». — в: J. Phys.: Conf. Series 2100 (2021), 012032.

6. A.S. Dobrovolskaya, E.A. Filimonova, V.A. Bityurin, A.N. Bocharov, – «Role of pressure waves in the heating of the end-gas in HCCI engine with activation by pulsed corona discharge» – в: J. Phys.: Conf. Series 2100 (2021), 012016
7. E.A. Filimonova, A.S. Dobrovolskaya, A.N. Bocharov, V.A. Bityurin, G.V. Naidis, — «Formation of combustion wave in lean propane-air mixture with a nonuniform chemical reactivity initiated by nanosecond streamer discharges in the HCCI engine». — в: Comb. Flame 215 (2020), с. 401–16.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»** (Кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета, д.ф.-м.н., профессор Знаменская И. А. и к.ф.-м.н., доцент Мурсенкова И.В.) – отзыв положительный, с замечанием:

– следовало бы проанализировать различия в применении плазмы наносекундных стримерных разрядов и пространственно-однородных разрядов на горение углеводородо-воздушных смесей с точки зрения кинетических и газодинамических процессов в камере сгорания.

2. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича» СО РАН** (ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н. Зудов В. Н.) – отзыв положительный, без замечаний.

3. **Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»** (Заместитель руководителя Отделения Плазменных Технологий Курчатовского комплекса ядерных транспортных энергетических технологий, к.ф.-м.н. Потапкин Б.В.) – отзыв положительный, без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что:

– д.ф.-м.н. Тупикин Андрей Викторович является крупным ученым в области исследования взаимодействия разрядов с химически реактивным потоком, в том числе с пламенами.

1. Зудов В.Н., Тупикин А.В., Инициирование гомогенного горения в высокоскоростной струе совместным воздействием оптического и электрического разрядов // Физика горения и взрыва. Т.58, №1. Р. 25-31, 2023 г.;

2. Arbuzov V.A., Arbuzov E.V., Dubnishchev Yu.N., Zolotukhina O.S., Lukashov V.V. and



Tupikin A.V. Hilbert-optic diagnostics of hydrogen-oxygen inverse diffusion flame // *Energies*. V.15, Iss.24. P.9566, 2022;

3. Зудов В.Н., Тупикин А.В. Влияние внешнего электрического поля на оптический разряд в скоростном потоке // *Журнал технической физики*. Т.92, вып. 2. С. 209-215, 2022 г;

4. Тупикин А.В., Замащиков В.В. Растяжение ламинарного пламени в слабом электрическом поле // *Физика горения и взрыва*. Т.56, No.2. С. 3-9, 2020 г.

– к.ф.-м.н., Кочетов Игорь Валерианович является признанным специалистом в области физики плазмы, чьи исследования касаются в том числе плазмохимии и влияния электрических разрядов на горение.

1. A.P. Torbin, A.V. Demyanov, I.V. Kochetov, P.A. Mikheyev and A.M. Mebel. Ozone production in a dielectric barrier discharge in air- and oxygen–methane mixtures. Experiment and modeling // *Plasma Sources Science and Technology*, V. 31, 035017, 2022;

2. N.A. Dyatko, I.V. Kochetov and V.N. Ochkin. Influence of the ionization process on characteristics of spatial relaxation of the average electron energy in inert gases in a uniform electric field // *Physical Review E*, V. 104, 065204, 2021;

3. Бернацкий А.В., Кочетов И.В., Очкин В.Н. Спектральные методы контроля примесей, их потоков и локализации в неравновесной низкотемпературной плазме пониженного давления // *Физика Плазмы*, Т. 41, No 9, С. 783-829, 2020 г;

4. P.A. Mikheyev, A.V. Demyanov, I.V. Kochetov, A.A. Sludnova, A.P. Torbin, A.M. Mebel and V.N. Azyazov. Ozone and oxygen atoms production in a dielectric barrier discharge in pure oxygen and O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> mixtures. Modeling and experiment // *Plasma Sources Science and Technology*. V. 29, 015012, 2020 г.

– Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» является профильной организацией, специализирующейся в том числе на проведении исследований в области физики плазмы, включая физику низкотемпературной плазмы, наносекундных разрядов, а также плазменно-стимулированного горения.

1. A.A. Ponomarev; N.L. Aleksandrov. Monte Carlo simulation of ion kinetics in nitrogen and oxygen plasmas under non-uniform electric field conditions// *Phys. Plasmas* 30, 053505, 2023;

2. M.A. Popov, I.V. Kochetov, A.Y. Starikovskiy, N.L. Aleksandrov. Repetitively pulsed nanosecond discharge plasma decay in propane–oxygen gas mixture in the presence of a heating electric field // *Combustion and Flame*, v. 233, 111611, 2021;

3. М.А. Попов, Е.М. Анохин, И.В. Кочетов, А.Ю. Стариковский, Н.Л. Александров. Влияние нагрева газа на распад плазмы с гидратированными ионами после

высоковольтного наносекундного разряда // М.А. Попов, Е.М. Анохин, И.В. Кочетов, А.Ю. Стариковский, Н.Л. Александров;

4. Э.М. Базелян, Н.Л. Александров, Электрическое поле в положительном стримере в длинных воздушных промежутках // Физика плазмы, 2022, Т. 48, № 7, стр. 639-647.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненного соискателем исследования:**

– установлен механизм быстрого продвижения волны горения за счёт взаимодействия с волнами давления при активации воспламенения неравновесной плазмой стримерного разряда;

– предложен способ управления самовоспламенением обеднённой топливно-воздушной смеси в компрессионном двигателе на основе найденной зависимости между самовоспламенением и моментом воспламенения активированной разрядом зоны;

– получены результаты газодинамического моделирования развития импульсно-периодического разряда в конфигурации «острие-острие» в воздухе, демонстрирующие, что в импульсно-периодическом разряде мегагерцовой частоты за наносекундные времена образуются активные частицы, в концентрации, достаточной для ускорения воспламенения в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания;

– получены результаты расчетов разрядного воздействия и нагрева на воспламенение углеводородо-воздушной смеси, иллюстрирующие преимущества создания химической неравновесности;

– разработана газодинамическая квазиодномерная (физическая и численная) модель, позволяющая эффективно учитывать сжатие без изменения геометрии расчёта, и полученные с её помощью результаты, показывающие важность учёта изменения внешнего давления при моделировании плазменно-стимулированного горения в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

– установлены механизмы влияния неравновесной плазмы стримерного разряда на все стадии процесса горения в камере сгорания компрессионного двигателя, от воспламенения обработанной разрядом зоны до возникновения самовоспламенения перед фронтом волны горения;

– полученные данные о влиянии разряда на топливовоздушную смесь представляют важны с точки зрения исследования фундаментальных характеристик плазменно-стимулированного горения.

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

– показано, что инициация высокочастотным коронным разрядом является способом для достижения оптимальных тепловых и мощностных характеристик двигателя и состава продуктов сгорания;

– предложенный способ управления переходом к самовоспламенению в компрессионном двигателе важен для разработки двигателей внутреннего сгорания на обедненных смесях;

– полученные знания о возможности и ограничения управления процессами горения при помощи воспламенителей на основе коронных разрядов необходимы для конструирования современных систем воспламенения в энергетических установках, в том числе двигательных.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, в которых исследуются фундаментальные и прикладные аспекты плазменно-стимулированного горения и разрабатываются новые энергетические установки, в частности, в Федеральном исследовательском центре химической физики имени Н.Н. Семёнова РАН, Московском физико-техническом институте (национальном исследовательском университете), Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана, НИИ ядерной физики им. Щ.В. Скобельцина Московского государственного университета, Государственном научном центре Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Институте Теплофизики СО РАН, Государственном научном центре Российской Федерации ФГУП «НАМИ», Центральном институте авиационного моторостроения им. П.И. Баранова.

**Оценка достоверности результатов** исследования выявила, что достоверность полученных результатов подтверждается квалифицированным применением проверенных теоретических и расчётных методов; а также сравнительным анализом полученных данных с экспериментальными и расчетно-теоретическими результатами, полученными другими авторами.

**Личный вклад соискателя** в представленные в настоящей диссертации исследования является ведущим. Автор принимала активное участие в планировании исследований и анализе результатов. Все результаты расчётов, выносимые на защиту, получены лично автором.

Часть результатов, выносимых на защиту (в положении №5) в данной диссертации опубликованы в статье №7 из списка публикаций автора, в которой также были

опубликованы результаты, вынесенные на защиту в докторской диссертации Филимоновой Елены Александровны (глава 8), поэтому необходимо более подробно остановиться на личном вкладе в эту работу Добровольской Анастасии Сергеевны и необходимости учёта этой статьи в диссертации.

Используемые в статье №7 схемы и модели изложены в разделе 2 «Numerical method» («Численный метод») и разделе 3 «Evaluation of temperature and concentrations of chemically active particles in the area activated by a high-frequency corona discharge» («Оценка температуры и концентраций химически активных частиц в области, активированной высокочастотным коронным разрядом»), и занимают всего 0.65 авторского листа (а.л.). Подраздел 2.1 – постановка задачи. Подраздел 2.2 (0.12 а.л.) написан Добровольской А.С., так как описываемая в нём модель была разработана и реализована в программном коде лаборатории 21.1 ей лично, и именно эти результаты (газодинамическая квазиодномерная модель) входят в положение №5 в представляемой к защите диссертации. Раздел 3 (0.46 а.л.) в публикации написан Филимоновой Е.А., в нём описывается модель разрядной зоны, при помощи которой задаются начальные условия в дальнейших расчётах по модели из раздела 2. Раздел 4 «Results and discussion» («Результаты и обсуждение», 0.53 а.л.) состоит из обсуждения и анализа результатов расчётов выполненных Добровольской А.С., но с использованием обеих моделей из раздела 2 и 3, анализ распространения волны горения проводился совместно, анализ кинетических механизмов влияния неравновесной плазмы на воспламенение активированной зоны выполнен Филимоновой Е.А. Текст раздела 4 написан Филимоновой Е.А. с некоторыми корректировками от Добровольской А.С., рисунки в этом разделе получены Добровольской А.С. Результаты, приведённые в разделе 4, упоминаются в диссертации, но на защиту не выносятся. Если обобщить, то Филимонова Е.А. и Добровольская А.С. несколько лет совместно и плодотворно работали над исследованием влияния неравновесной плазмы на процессы в камере сгорания, при этом, Филимоновой Е.А. выполнена разработка всех кинетических механизмов, как горения, так и плазмохимических реакций, а также модели активированной зоны, учитывающей многоимпульсность и многоканальность стримерного разряда в камере сгорания, также ей выполнены все расчёты с помощью нульмерной модели камеры сгорания (в её диссертации она называется «химический реактор сжатия»). Добровольская А.С. выполнила разработку газодинамической квазиодномерной модели, постановку и реализацию параметрического исследования влияния стримерного разряда на процесс горения в двигателе, установила механизмы, влияющие на распространение волны горения и переход к самовоспламенению.

Необходимость включить публикацию №7 в список публикаций Добровольской~А.С. в данной диссертации вызвана тем, что опубликованная в ней в разделе~2.2 газодинамическая квазиодномерная модель используется для получения результатов Главы~4 и соответствующих положений, выносимых на защиту.

Апробация результатов исследования проводилась на 12 российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе подготовлены при определяющем участии автора.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Добровольская Анастасия Сергеевна ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы, согласилась с замечаниями и привела собственную аргументацию.

На заседании от 27.12.2023г. диссертационный совет принял решение за установление механизмов влияния неравновесной плазмы наносекундного стримерного разряда на процессы горения в камере сгорания компрессионного двигателя, а также исследование возможностей управления этими процессами при помощи вариации параметров разряда присудить Добровольской Анастасии Сергеевне ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) в количестве 27 человек, из них очно: 10 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 7 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 2 доктора наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 5 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 27, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н., академик

Петров О.Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

к.ф.-м.н.

Тимофеев А.В.

27.12.2023г.