

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

**СТЕНОГРАММА**

заседания диссертационного совета Д 002.110.03 на базе  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)  
от 3 апреля 2019 г. (протокол № 5)

Защита диссертации **Сафронова Андрея Александровича**  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
**«Исследование процессов формирования капельного потока и  
радиационного теплообмена в бескаркасных системах отвода  
низкопотенциального тепла в космосе»**

Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.110.03 на базе  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)  
Протокол № 5 от 3 апреля 2019 г.

Диссертационный совет Д 002.110.03 утвержден Приказом **Министерства образования и науки РФ от 15.02.2013 г. № 75/нк** в составе 25 человек. На заседании присутствуют 19 человек, из них 14 докторов наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы и 5 докторов наук по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

**Председатель** – председатель диссертационного совета Д 002.110.03  
д.ф.-м.н., профессор Вараксин А.Ю.

**Ученый секретарь** – ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.03  
д.т.н. Директор Л.Б.

1	Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Присутствует
2	Батенин В.М.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	05.14.01	Присутствует
3	Директор Л.Б.	Д.т.н.	05.14.01	Присутствует
4	Алхасов А.Б.	Д.т.н., профессор	05.14.01	Отсутствует
5	Аминов Р.З.	Д.т.н.	05.14.01	Отсутствует
6	Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Присутствует
7	Битюрин В.А.	Д.ф.-м.н.	01.02.05	Присутствует
8	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Присутствует
9	Зайченко В.М.	Д.т.н.	05.14.01	Присутствует
10	Зейгарник В.А.	Д.т.н.	05.14.01	Присутствует
11	Климов А.И.	Д.ф.-м.н.	01.02.05	Присутствует
12	Кобзев Г.А.	Д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Присутствует
13	Красильников А.В.	Д.т.н.	01.02.05	Присутствует
14	Леонов С.Б.	Д.ф.-м.н.	01.02.05	Отсутствует
15	Масленников В.М.	Д.т.н., профессор	05.14.01	Отсутствует
16	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	01.02.05	Присутствует
17	Недоспасов А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Отсутствует
18	Поляков А.Ф.	Д.т.н., профессор	01.02.05	Присутствует
19	Попель О.С.	Д.т.н., доцент	05.14.01	Присутствует
20	Пятницкий Л.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Присутствует
21	Седлов А.С.	Д.т.н., профессор	01.02.05	Отсутствует
22	Синкевич О.А.	Д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Присутствует
23	Томаров Г.В.	Д.т.н., профессор	01.02.05	Присутствует
24	Чиннов В.Ф.	Д.ф.-м.н.	01.02.05	Присутствует
25	Шугаев Ф.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Присутствует

## ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации инженера отделения 6 Государственного научного центра Федерального государственного унитарного предприятия «Центр имени Келдыша» (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша») **Сафронова Андрея Александровича** на тему «Исследование процессов формирования капельного потока и радиационного теплообмена в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. Диссертация выполнена в отделении 6 ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» (125438, г. Москва, ул. Онежская, д. 8, kerc.msk.ru).

### **Научный руководитель:**

**Коротеев Анатолий Анатольевич** – Академик, д.т.н., профессор, директор Научно-образовательного инновационного центра «Новые космические технологии и наземные высокотехнологичные процессы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)» (г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4)

### **Официальные оппоненты:**

**Бухаров Александр Васильевич** - гражданин РФ, д.ф.-м.н., профессор кафедры низких температур Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Национального исследовательского университета "МЭИ" (111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14)

**Орлов Денис Михайлович** – гражданин РФ, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Сколковского института науки и технологии Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования "Сколковского института науки и технологий" (МО, Одинцовский район, Новоивановское городское поселение, д. Сколково, ул. Новая, д. 100).

### **Ведущая организация:**

Акционерное общество "Ракетно-космический центр "Прогресс" (г. Самара, ул. Земеца, д. 18, (846) 955-1361, samspace.ru, e-mail: mail@samspace.ru)

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., профессор Бухаров А.В., к.ф.-м.н. Орлов Д.М. и научный руководитель Сафронова А.А., д.т.н. Коротеев А.А.

## СТЕНОГРАММА

### Председатель

Добрый день, уважаемые члены совета и все присутствующие. Есть предложение начать работу. Сегодня на повестке дня у нас защита диссертации Сафронова Андрея Александровича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Исследование процессов формирования капельного потока и радиационного теплообмена в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе» по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. Вначале я предоставлю слово ученому секретарю Леониду Бенциановичу для того, чтобы он доложил нам комплект всех необходимых для проведения защиты документов.

### Ученый секретарь

*(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).*

### Председатель

Есть вопросы к ученому секретарю? Вопросов нет. Тогда слово предоставляется Андрею Александровичу. На доклад – 20 минут, если больше – будем останавливать. Пожалуйста.

### Сафронов А.А.

*Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Сафронова А.А. прилагается).*

### Председатель

Спасибо, Андрей Александрович. Хорошо Вы уложились в отведенное Вам время. Теперь, уважаемые коллеги, есть возможность задать вопросы.

### Кобзев Г.А.

Можно вопрос, да?

### Председатель

Да.

### Кобзев Г.А.

Мне вот не очень понятно, скажите пожалуйста, у Вас в рассмотрении вообще отсутствуют понятия «вещество», «свойства вещества» и так далее. Нет у Вас сорта вещества и его свойств.

### Сафронов А.А.

В первой части считается, что жидкость, которая распадается, - ньютонова. У неё есть вязкость, плотность, поверхностное натяжение, - они учитываются в безразмерных параметрах, а дальше уже моделируется...

### Кобзев Г.А.

На практике у Вас, наверное, есть вещество какого-то определенного сорта.

**Сафронов А.А.**

Например, эксперименты проводились с вакуумным маслом VM1-C. На слайде, вот, например, приведена зависимость его вязкости (динамической) от температуры. Дальше, известна его плотность - 800 килограмм на метр кубический. Поверхностное натяжение 30 миллиньютонов на метр квадратный. Ну, и так далее. А во второй части, вот, собственно, приводится, например, зависимость спектрального коэффициента поглощения в рабочих телах, в одном из рабочих тел, от длины волны, например. Вот эти параметры. Исходя из них, мы рассчитываем интегральную степень черноты капли.

**Кобзев Г.А.**

Рабочее тело-то какое, скажите.

**Сафронов А.А.**

Здесь пентафенилтриметилтрисилоксан. Это одно из потенциальных рабочих тел. Дальше, есть некоторые...

**Кобзев Г.А.**

А что, здесь вот температурной зависимости нет никакой, да?

**Сафронов А.А.**

Ну, она слабо меняется.

**Кобзев Г.А.**

Какой диапазон температур?

**Сафронов А.А.**

Снизу мы ограничены температурой 280 К – это равновесная температура капли в солнечном излучении. Верхняя температура – это когда она начинает интенсивно испаряться и потом уже начинает разлагаться. Это порядка 500-600 К. Вот в этом диапазоне достаточно слабо изменяется эта зависимость, и фактически, можно считать постоянной зависимостью.

**Красильников А.В.**

У меня такой вопрос. Всё это для космических аппаратов, приложения у Вас диссертации самой. Так вот, процесс формирования капельного потока в невесомости и на Земле отличается по физике? А то у Вас установка была на Земле, а пойдет это все на космические...

**Из зала**

На воздухе... Там величина ускорения вообще отсутствует. Вот что в невесомости?

**Сафронов А.А.**

Извините, забыл сказать во время доклада. Во-первых, эксперименты проводились не только в воздухе, но еще и в вакуумной камере с остаточным давлением газов в несколько десятков Паскалей. И эти результаты измерений в вакуумной камере совпали с результатами в воздухе.

А сила тяжести, конечно, может влиять. Но она влияет на струи, когда их скорость мала, или когда их радиус велик и скорость тоже достаточно мала. Влияние эффекта силы тяжести на процесс капиллярного распада достаточно подробно исследован, давно уже. В данном случае сила тяжести не влияет на процесс капиллярного распада. То есть, грубо говоря, распад происходит на длине в несколько сантиметров (истечение струи из генератора) при скорости порядка 5-8 метров в секунду. То есть, сила тяжести там не успевает повлиять на процесс капиллярного распада.

### **Учёный секретарь**

Так, Владимир Сергеевич.

### **Воробьёв В.С.**

У Вас на некоторых слайдах был в уравнениях частный дифференциал третьего порядка. И как-то Вы не пояснили, с каким процессом он связан и почему он возникает. Это немного необычно для гидродинамических уравнений. Вот, вот этот.

### **Сафронов А.А.**

У нас это динамическое уравнение получается из редукции системы Стокса. Это у нас инерционный член, здесь вязкость, тут всё понятно. А этот член описывает влияние поверхностного натяжения. По сути, это градиент давления. Давление считается постоянным по радиусу струи, а градиент давления обусловлен только влиянием капиллярных сил. Дальше у нас есть два радиуса кривизны. Первый радиус кривизны – капля круглая,  $1/r$ . Вот его производная – минус единица на  $r^2$ , ну еще минус появляется и минус сокращается с градиентом. А второй радиус кривизны – это вот такая вот кривизна. Ну и как известно из математики, кривизна этой кривой определяется, связана со второй производной радиуса струи по координате. Дальше нам нужно еще раз продифференцировать эту вторую производную, потому что нужен градиент давления. В итоге получается третья производная радиуса струи. Это типичное поведение для капиллярных процессов. Для капиллярных процессов это обычно, для гидродинамики – нет.

### **Батенин В.М.**

А к этому же можно? Скажите, пожалуйста, при разрыве этой шейки и схлопывании большой капли не возникает ли радиальных усилий, которые выбрасывают микрокаплю из струи, в сторону?

### **Сафронов А.А.**

Вот рисунок, где этот процесс изображен. Плохо видно, к сожалению. Эксперименты показывают, что этого нет. Видно вот, этот процесс происходит здесь. Если это описывать аналитически, здесь просто есть соотношение сил вязкости, поверхностного натяжения, в общем, оказывается, что этого не происходит в данном случае. Но в принципе, конечно, такое может произойти, если взять какую-нибудь струю, большую, невязкую, такое может быть.

### **Батенин В.М.**

Схлопывание идёт, значит, радиальные усилия должны присутствовать.

**Сафронов А.А.**

Вот смотрите, в данном случае формируются такие тоненькие-тоненькие перетяжки. Вот она обрывается где-то тут и движется. Когда оно движется, его радиус увеличивается, вот тут видно. Оно оторвалось и начало двигаться. Смотрите, дальше на конце формируется вот такой большой кусок вещества большого радиуса.

**Из зала**

Поверхностное натяжение стягивает их.

**Сафронов А.А.**

Он увеличивается. Приходит уже большая частица. И дальше уже эффективно поглощается.

**Председатель**

Спасибо. Анатолий Иванович, пожалуйста.

**Климов А.И.**

Вот по распаду капель работ тьма, и хорошо известны и принципы, и значения... Что нового у Вас по сравнению с тем, что было сделано в этих работах? Вы должны как-то преемственность показать.

**Сафронов А.А.**

Воду исследовали очень давно уже.

**Климов А.И.**

И не только воду.

**Сафронов А.А.**

Не только воду. Но здесь число Онезорге оказывается настолько велико, что уже большое влияние оказывают процессы автомодельного разрыва струй. И необходимо связывать друг с другом закономерности развития волн малой амплитуды и (неразборчиво) этих закономерностей.

**Климов А.И.**

В ранних работах всё это есть. Что нового у Вас по сравнению с ними?

**Сафронов А.А.**

Принципиально нового, того, чего раньше нигде не было: с начала 90-х годов, за границей, в основном в Англии и Франции проводилось моделирование автомодельных процессов разрыва струй. При этом, как правило, рассматривался случай, когда вязкость настолько велика, что она гасила все остальные процессы. И известно только одно решение для этого случая. Это решение было предложено в 1995 году Папагемном, а потом его Эггерс развивал и некоторые для него следствия получил. Например, он доказал, что оно не имеет периодических решений. Но при выводе этого соотношения ранее не учитывался этот вот член, с третьей производной. То есть, считалось, что струя.

Считалось, что радиус кривизны струй, считалось, что эта кривизна несущественна, радиус. Соответственно, я в работе.

Поскольку эффекты формирования микросателлитов наблюдались, их нужно объяснять. И удалось их объяснить с помощью этого члена, с третьей производной. При этом система в принципе начинает вести себя по-другому. Если здесь есть параболическое решение, которое никакое не периодическое, то здесь возникают периодические решения, они оказываются достаточно сложны. Они описывают динамику этого процесса, который численно моделировался. То есть, вот рассчитаны эти зависимости – этого ранее нигде не было. Далее, исследовался процесс отрыва зародыша этого микросателлита от струи. И совсем новое...

#### **Климов А.И.**

Сателлиты там были. Здесь у Вас очень большая вязкость, наверное.

#### **Сафронов А.А.**

Нет. Здесь из-за того, что очень большая вязкость, появляются микросателлиты и изменяется механизм их формирования. Они, конечно... Вот если эту перетяжку рассмотреть, там если струя невязкая, то микросателлиты формируются в том числе за счет вторичного возникновения неустойчивости. А здесь механизм формирования микросателлитов связан с большим значением второй производной в этой точке. И по сути они формируются в окрестности максимума скорости в струе. И они формируются как диссипативная структура на этом максимуме. Вот это является совершенно новым. Ранее это не описывалось.

#### **Председатель**

Спасибо. Еще вопросы, пожалуйста. Лев Николаевич, пожалуйста.

#### **Пятницкий Л.Н.**

У Вас важная роль отводится возмущениям. Возможно я прослушал, но всё равно – что Вы понимаете под возмущением? Имеется в виду форма возмущающего движения. И как оно возникает?

#### **Климов А.И.**

Акустика, пьезоэлемент там.

#### **Пятницкий Л.Н.**

Без этого посчитать её параметры невозможно.

#### **Климов А.И.**

Пьезотаблетка там у них стоит.

#### **Сафронов А.А.**

Здесь пьезоэлемент внутри генератора, он создаёт акустическое колебание.

#### **Пятницкий Л.Н.**

Что-что? Я плохо слышу.



**Климов А.И.**

Пьезоэлемент. Но у Вас капилляр-то меньше, чем длина волны, очень плохой разветвитель. Вот о чём я. Так сказать, это никуда не годится, акустическое излучение.

**Сафронов А.А.**

Да, конечно, они очень плохо проникают.

**Климов А.И.**

Ну и что хорошего?

**Сафронов А.А.**

Но они всё-таки проникают.

**Климов А.И.**

Да ну...

**Сафронов А.А.**

Есть видеосъемка этого.

**Председатель**

В продолжение этого вопроса, близкий возник. Вот по характеристикам колебаний всё-таки. Любое колебание – это амплитуда и частота, наверное. Что Вы здесь скажете, чтобы почувствовать эти величины? И вот физика проникновения дальше, как вот распространение.

**Климов А.И.**

Там отражение.

**Председатель**

Что, никак?

**Сафронов А.А.**

Частота колебания зависит от того... Распад происходит сильнее всего в случаях, когда... В общем, длина волны колебаний должна быть больше, чем два пи-эр, то есть, периметр струи. Дальше, на некоторых частотах она распадается лучше, на некоторых хуже. Оптимальное волновое число - это 0.7 в этом безразмерном виде. Характерная амплитуда этих колебаний на выходе составляет в моих экспериментах 2-3%. Экспериментально ее измерить не получилось, но она была рассчитана.

**Председатель**

То есть, в эксперименте измерялось (неразборчиво)?

Конечно, без этого они не могут...

**Сафронов А.А.**

В зависимости от того, какое напряжение мы подаем на пьезоэлемент, у нас меняется длина нераспавшейся части струи. Этот процесс достаточно хорошо можно наблюдать.

**Председатель**

Лев Николаевич тогда, пожалуйста.

**Пятницкий Л.Н.**

Вы используете коэффициент теплообмена тогда какой-то. Что Вы в нём учитываете?

**Сафронов А.А.**

В первой части или во второй?

**Пятницкий Л.Н.**

У Вас есть разные температуры, значит, есть и теплообмен.

**Из зала**

Только радиационный у них. Космос там. Радиационное излучение в космосе. Стефан-Больцман.

**Сафронов А.А.**

Космическое пространство, вот уравнение остывания, только излучение.

**Из зала**

Солнышко рисуете.

**Синкевич О.А.**

Ну так не теплообмена, а излучения.

**Сафронов А.А.**

Для Солнца, конечно, степень черноты для солнечного излучения оказывается другой, чем для теплового излучения. Она рассчитывается отдельно.

**Синкевич О.А.**

Всё нормально.

**Председатель**

Олег Арсеньевич, был вопрос?

**Синкевич О.А.**

У меня такой вопрос. У Вас здесь в конце были приведены интересные графики зависимости мощности. Почему эти графики Вы не включили в автореферат? Вот эти результаты довольно представительные, которые соответствуют названию... Первый вопрос. Почему они не вошли в автореферат? Вы посчитали их незаслуживающими?

**Сафронов А.А.**

По-моему, там есть что-то такое, если не ошибаюсь.

**Председатель**

В диссертации есть они?

**Сафронов А.А.**

Конечно, есть.

**Из зала**

Ну это же один из основных выводов.

**Синкевич О.А.**

Конечно. И второй вопрос. Вот когда Вы говорите о третьей производной, если мы возьмем дисперсионное уравнение линейное для поверхностных волн, то слагаемое, которое у поверхностного натяжения, оно пропорционально  $k^3$ . И когда Вы пишете соответственно этому дисперсионному уравнению, третья производная отсюда возникает.

**Сафронов А.А.**

Конечно, да.

**Воробьёв В.С.**

Это пояснение, а не вопрос.

**Председатель**

Анатолий Иванович, пожалуйста.

**Климов А.И.**

Вот понятно, что вторая часть у Вас основная. Первую можно даже и не смотреть, а вот вторая основная. И казалось бы эксперимент должен быть сделан. Расчет, сравнить в вакуумных условиях такой пелены. Но ведь ничего не сделано. И с чем сравнивать-то? Насколько эффективно работает? Или это просто высосано из пальца?

**Сафронов А.А.**

Вот если создавать капли размером даже 100 мкм. Пусть их интегральная степень черноты строго равна единице. Оказывается, что свободно остывающая капля, когда ни с чем не переоблучается, даже если стенки идеально захлаждены, она остывает за 1 секунду на величину порядка 1-2 градусов Цельсия. Дальше нам, чтобы какой-то перепад температур зафиксировать, нам нужно несколько секунд, чтобы надёжно зафиксировать. Дальше, мы хотим не одну каплю, а мы хотим много, то есть, капельный поток. Скорость остывания ещё сильнее уменьшается. И в итоге оказывается, что для того, чтобы они хоть на сколько-то высветились, нужно чтобы они хотя бы несколько секунд пролетели. Дальше, в условиях Земли мы никогда не можем убрать силу тяжести. Соответственно, получается размер...

**Климов А.И.**

В вакууме... Вы же говорили, что тяжесть Вам не важна.

**Сафронов А.А.**

Нет, тяжесть важна, когда мы будем проводить экспериментальные измерения на Земле.

**Климов А.И.**

Вы ж говорите, 9 атмосфер у Вас выдавливает этот самый... Струи-то Ваши.

**Сафронов А.А.**

9 атмосфер не выдавливается.

**Из зала**

9 метров в секунду.

**Климов А.И.**

Да, 9 м/с. Выдавливаются струи у Вас.

**Сафронов А.А.**

Чтобы они успели высветиться, нам нужно какое-то время. Время надо несколько секунд. Есть у нас начальная скорость, есть сила тяжести. И получается, что длина пролёта составляет десятки метров.

**Климов А.И.**

Ну какой это холодильник – десятки метров?

**Сафронов А.А.**

В условиях Земли. В космосе мы можем довести скорость до двух метров в секунду, потому что там нет силы тяжести. В условиях Земли, из-за того, что длина пролёта очень большая, десятки метров, невозможно создать такую вакуумную камеру, чтобы провести эти испытания на Земле. Эти эксперименты должны проводиться в космосе. В том числе этот третий космический эксперимент, в нём длина пролёта будет достаточно большой и там уже можно будет измерить. Во время первого космического эксперимента длина была менее, чем полметра, если не ошибаюсь. Во втором – примерно такая же. То есть, за это время они просто не успевают остынуть. А на Земле нельзя промерить, потому что есть сила тяжести, она всегда ускоряет эти капли на Земле, и необходимо создавать просто гигантскую вакуумную камеру, чтобы промерить.

**Климов А.И.**

В ночных условиях в космосе остывание одно, на солнце – другое.

**Сафронов А.А.**

Конечно, это учитывалось. Рассчитывалось с учётом Солнца остывание в том числе.

**Батенин В.М.**

Если в космосе, то эволюция летательного аппарата сказывается как-нибудь?

**Сафронов А.А.**

Да, конечно. Есть Земля, есть Луна.

### **Батенин В.М.**

Нет. Я имею в виду ускорения: вращения, изменения курса. Как в этом случае будет работать Ваша система?

### **Сафронов А.А.**

Чтобы повернуть достаточно резко, его, конечно, нужно выключать, этот капельный холодильник. Но эти результаты получены в том числе для случая транспортного энергетического модуля. И в этом случае (он изображён на слайде верхнем) транспортно-энергетический модуль, он движется за счёт ионных двигателей, и оказывается, что ускорения там достаточно маленькие. У них тяга – какие-то граммы у всех вместе, а весь аппарат весит несколько десятков тонн. То есть, ускорение очень маленькие и в принципе капли успевают нормально пролететь, и аппарат не успевает за это время повернуть. То есть, ионные двигатели, у которых достаточно маленькая тяга... (неразборчиво)

### **Батенин В.М.**

Медленная эволюция, понятно.

### **Председатель**

Спасибо. По ощущениям, наверное, достаточно вопросов. Теперь слово предоставляется научному руководителю, академику российской академии наук Коротееву Анатолию Анатольевичу.

### **Коротеев А.А.**

Уважаемый председатель, уважаемые члены диссертационного совета, оппоненты и присутствующие на защите. Андрей Александрович Сафронов начал свою научную деятельность в Центре Келдыша уже более восьми лет назад, являясь в то время студентом Московского физико-технического института. И с группой исследователей он начал заниматься разработкой концептуальных основ бескаркасных систем отвода тепла в космосе. После успешного окончания МФТИ, он окончил институт с отличием, исследования Андреем были продолжены. За время своей работы он зарекомендовал себя очень трудолюбивым, очень целеустремленным и очень, я бы употребил такое слово, качественным работником. Безусловно, Андрей является ярким представителем физтеховской школы, позиционирующем себя в науке, руководствуясь старым девизом «быть там, где трудно». Он не боится сложных задач, самостоятельно находит пути их решения, не надергивает из интернета кусочки и фрагменты требуемых дополнительных знаний, как это сейчас делают многие молодые исследователи, а идет в библиотеку, берет большое количество литературы, изучает суть происходящего и, как правило, самостоятельно докапывается до истины.

Я бы сказал, что еще одним очень большим достоинством Андрея является то, что он одинаково хорошо владеет как теоретическими, так и экспериментальными методами проведения научных исследований. Вначале, когда мы начали работать вместе, многие наши технари были приятно удивлены тем, что он самостоятельно трудится на стенде, не боится испачкать руки в вакуумном масле, которое у нас льется рукой, и очень быстро освоил сложное и дорогое экспериментальное оборудование, то есть здесь он тоже чувствует себя очень уверенно.

К настоящему времени им опубликовано достаточно большое количество работ, многие из которых – в достаточно высокорейтинговых журналах, индексируемых в

информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и Scopus. И я считаю, что он безусловно сформировался как квалифицированный научный работник и заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05. Мы очень рады тому, что такой хороший выпускник физтеха оказался в нашем коллективе.

### **Председатель**

Спасибо, Анатолий Анатольевич. Есть ли вопросы к научному руководителю? Если вопросов нет, то тогда еще раз спасибо.

Сейчас слово предоставляется Леониду Бенциановичу, ученому секретарю, для оглашения письменных отзывов. Отзывы ведущей организации, отзывы Центра имени Келдыша, где выполнялась диссертация, а также все поступившие отзывы на автореферат диссертации.

### **Ученый секретарь**

Заключение Центра Келдыша, подписанное генеральным директором Кошлаковым. Общую часть я не зачитываю, примерно то же самое что и в характеристике. Принято следующее заключение. Отмечается личный вклад в проведенные исследования, степень достоверности результатов, практическая ценность и полнота изложения материалов в публикациях. И делается итоговое заключение. Диссертация «Исследование процессов формирования капельного потока и радиационного теплообмена в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе» Сафронова Андрея Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени по специальности 01.02.05 в диссертационном совете на базе нашего института. Ну и рекомендации оппонентов и ведущей организации. Заключение принято на заседании НТС отделения 6 Центра Келдыша. Подготовлено Филатовым Николаем Ивановичем, заместителем председателя секции, и секретарем секции Ерохиным.

Ведущая организация ракетно-космический центр «Прогресс». Отзыв ведущей организации утвержден первым заместителем генерального директора генеральным конструктором Равилем Нургалиевичем Ахметовым. В отзыве рассмотрена структура работы, отмечена научная актуальность и новизна, оценена достоверность результатов, и сделан вывод о соответствии работы порядку присуждения ученых степеней. По работе имеется два замечания. Первое – в работе не проводится сопоставление параметров, характеризующих вероятность поражения излучателями космическими микрометеоритными частицами. Второе замечание – формальное: текст диссертации содержит опечатки. И дальше вывод о том, что диссертация представляет собой законченное научное исследование и так далее, и так далее.

### **Председатель**

С отзывом ведущей организации всё? Тогда отзывы на авторефераты.

### **Ученый секретарь**

На авторефераты поступило, по-моему, пять отзывов.

*(Первый отзыв.)* Отзыв от ведущего научного сотрудника Центра нано-гетро структур федерального государственного бюджетного учреждения Физико-технический институт имени Иоффе доктора технических наук Коваленко. Отзыв положительный, с замечаниями. Замечание длинное. К недостаткам работы следует отнести отсутствие анализа возможности использования обнаруженных волновых явлений для управления энергетическими характеристиками излучателя. Кроме того, ряд интересных результатов,

касающихся устойчивости радиационного остывания, получен в рамках подхода к изучению капельной пелены как дискретной среды. Вместе с тем, хотелось бы видеть всесторонний анализ возможности существования этих эффектов и в сплошной среде. Также весьма интересным является упомянутое, но не раскрытое влияние на устойчивость процесса отвода тепла от КХИ факторов деформации капельного потока, в частности, связанных с наличием пространственного электрического заряда, причем не только за счет электризации при истечении из генерирующего устройства, но и за счет воздействия внешнего излучения космического пространства. Последние факторы, переменные по траектории полета, могут быть весьма существенными для свободно распространяющегося в открытом космосе капельного потока диспергированной пелены сверхвысоковакуумных теплоносителей как на основе традиционных жидких диэлектриков, так и принципиально новых рабочих тел для КХИ на основе проводящих ионных жидкостей.

**Второй отзыв** - ВРИО директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук, руководитель лаборатории химических проблем энергетики, д.т.н. И.Ю. Кручинина. Отзыв положительный, с замечаниями. В качестве недостатка работы следует отметить некоторую разнородность исследуемых явлений, из-за чего главы диссертации выглядят изолированными.

**(Третий отзыв.)** Замечание профессора кафедры 601 МАИ, д.т.н., профессора А.В. Ненарокова. Отзыв положительный, с замечаниями. Недостатком работы является недостаточно подробное описание параметров работы генератора капельного потока во время проведения экспериментов. В частности, не приведены значения амплитуды акустического поля во внутреннем объеме генератора капель. Несмотря на отмеченное замечание, диссертационная работа заслуживает положительной оценки.

**(Четвертый отзыв.)** Отзыв доцента кафедры газотурбинных и нетрадиционных энергоустановок МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н., доцента А.Н. Арбекова. Отзыв положительный, с замечаниями.

1. Отсутствует экспериментальное подтверждение результатов, полученных автором диссертации при численном моделировании радиационного остывания диспергированной пелены.

2. Из представленного в автореферате материала не ясно, каким образом учитываются особенности теплообмена в угловых струях теплоносителя капельного холодильника-излучателя. Кроме того в тексте автореферата имеется ряд положений, сформулированных не совсем четко, так на стр. 4 это касается радиационного теплообмена вещества низкотемпературных теплоносителей и введенного на стр. 9 термина «толщина струи», который на стр. 12 назван радиусом.

**(Пятый отзыв.)** Отзыв заведующего лабораторией проблем теплопереноса Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, д.ф.-м.н., академика РАН С.В. Алексеенко и ведущего научного сотрудника той же организации, д.ф.-м.н. С.П. Актершева. Отзыв положительный, без замечаний.

**(Шестой отзыв.)** И последний отзыв научного сотрудника лаборатории 501 Института космических исследований Российской академии наук, к.т.н. И.А. Шашкова. Отзыв положительный, с замечаниями. В работе подробно исследовано развитие гидродинамических неустойчивостей капиллярного течения в тонкой перетяжке, соединяющей зародыши капель. Однако не приведены ни расчеты, ни экспериментальные измерения скорости движения образовавшихся микросателлитов относительно основных капель. Кроме того, не исследовано взаимодействие микросателлитов с образовавшимися каплями большого размера и не дан ответ на вопрос: будет ли происходить процесс

коагуляции частиц, или же они упруго отразятся после столкновения.  
Всё.

### **Председатель**

Спасибо Леониду Бенциановичу. Вопросы возникли у кого-нибудь? Нет. Тогда, Андрей Александрович, Вам предоставляется слово для ответа на замечания, которые прозвучали в отзыве ведущей организации и, я насчитал, в шести отзывах, поступивших на автореферат.

### **Сафронов А.А.**

Отзыв ведущей организации. Определение того, насколько велика метеоритная уязвимость для капельного холодильника не проводилось потому, что она по определению гораздо меньше, чем у других систем. Понятно, что существует вероятность того, что достаточно большая частица попадет в генератор капель, или в уловитель, но она на порядки меньше, чем в случае панельных холодильников-излучателей. Это заранее понятно, потому такие расчеты и не проводились.

Отзыв из МГТУ имени Баумана – об экспериментальных подтверждениях результатов моделирования теплового остывания. В условиях Земли для того, чтобы частица успела высветиться и остыть, необходимо строить слишком большие вакуумные камеры строить, чтобы это экспериментально измерить. То есть нужно, чтобы она несколько секунд летела, а камеры – слишком маленькие, которые имеются для этого. А в космосе такие эксперименты не проводились, потому что в космосе проводились эксперименты с капельными потоками меньших размеров.

(Отзыв Института космических исследований). По поводу того, произойдет ли столкновения частиц и произойдет ли их коагуляция. Действительно, такие исследования не проводились. Потому что на этот процесс влияют атмосферные условия, а в вакуумной камере не удалось это заснять. Во-вторых, в условиях космического пространства происходит электризация капельного потока в результате его взаимодействия с космической плазмой. Чем меньше частицы, тем быстрее происходит процесс их электризации. И получается, что необходимо исследовать процесс коагуляции заряженных частиц, а для этого нужно знать их заряд. Эта задача до настоящего времени полностью не решена, расчета их электризации, поэтому оценки коагуляции не проводились.

(Отзыв Физико-технического института имени Иоффе). Волновые процессы составляют несколько процентов от мощности капельного, то есть их влияние находится на величине в несколько процентов. Поэтому не проводилось исследование возможности их использования. По поводу модели сплошной среды. Проводилось моделирование неустойчивости в модели, когда капельный поток – не дискретная, а сплошная среда. Оказалось, что в этом случае существуют неустойчивости. Но характерный масштаб, на которых они начинают развиваться и зарождаться, оказывается меньше, чем размер капель. Получается, что моделирование чисто в модели сплошной среды невозможно. Получается, нужно производить сшивку – сплошной среды на большом масштабе и какие-то дискретные модели на малых масштабах. Поэтому не проводилось моделирование в рамках подхода сплошной среды.

С остальными замечаниями согласен.

### **Председатель**

Уважаемые коллеги, может быть у кого-то возник вопрос, который он хочет задать?



### **Климов А.И.**

Все-таки Вы не ответили на важный вопрос, мне кажется. Понятно, что зарядка капель играет очень важную роль во всех процессах. И то, что оппонент в отзыве на автореферат говорит, что солнечный ветер будет заряжать систему, и она будет совсем по-другому работать, Вы не ответили.

### **Сафронов А.А.**

В работе этого действительно нет. Потому что задача до конца не решена. Разные группы проводили моделирование этого процесса, я тоже принимал участие в этом. В принципе, результаты показывают, что в условиях, когда капельный поток достаточно большой, и нет геомагнитных бурь, то капли заряжаются достаточно слабо. То есть, если считать начальную толщину потока около десяти сантиметров, то на длине пролета в двадцать метров, она разлетается на десять – пятнадцать сантиметров. То есть конечная толщина потока становится около тридцати сантиметров. И, таким образом, даже если учесть что были какие-то вибрации, даже с учетом вибраций не успевает поток развалиться. И происходит сохранение структуры потока.

### **Синкевич О.А.**

Не об этом идет речь? Когда струя топлива истекает из автозаправщика, то возникает заряд, причем без всяких бурь на Солнце.

### **Сафронов А.А.**

Это очень многофакторная задача, потому её пока и не удалось до конца решить. Капельный холодильник не сам по себе существует. Во-первых, он испаряет вещество и создается атмосфера вокруг этого капельного холодильника. Это влияет на процесс электризации. Далее, у космического аппарата всегда есть работающие двигатели. Они создают свою атмосферу, которая взаимодействует с этой атмосферой. Происходят процессы ионизации. Если это учитывать, какие-то оценки проводились, то если достаточно мощные двигатели работают, то это будет гаситься. То есть за счет малого потенциала плазмы. Это очень многофакторная задача, она в настоящее время еще никем не решена полностью.

### **Председатель**

Андрей Александрович, давайте дальше пойдем тогда. Слово предоставляется официальному оппоненту, доктору технических наук Бухарову Александру Васильевичу, Московский энергетический институт.

### **Бухаров А.В.**

Мне очень понравилось, столько вопросов у учёного совета, у уважаемого председателя. Тема в свою очередь является достаточно интересной. Вопрос у меня просто такой: я могу зачитать отзыв по всем вещам...

### **Председатель**

Необязательно. Максимально лаконично.

## **Бухаров А.В.**

Работа Сафронова Андрея Александровича посвящена проблеме бескаркасных систем сброса тепла. Тема на самом деле очень важная. Если для ближнего космоса проблемы, связанные со сбросом тепла, решены, то тема, связанная со сбросом тепла в дальнем космосе, до сих пор на самом деле решения однозначного не имеет. Поэтому вопросы, связанные неким образом с решением этой вот проблемы, с капельным холодильником-излучателем, они представляют важный такой, не только научный, но и технический интерес.

Возможно, я сниму ряд вопросов и в некоем смысле защищу диссертанта, попытаюсь чуть остановиться на некой истории. Вопросы, связанные со сбросом тепла в дальнем космосе, впервые были озвучены аж в семидесятых годах прошлого века, причем, как это и бывает обычно, это сделали наши люди, а потом туда присоединилось НАСА, и вопросы, связанные с приоритетом и прочим, - сейчас везде упоминается именно эта ветвь. Но после 70-х годов, после некоего бума, связанного с отводом тепла, в 80-е и в 90-е, проблема казалась достаточно далёкой и только в отдаленной перспективе решаемой. Поэтому был какой-то застой, когда все работы, проводившиеся по этой теме, в том числе и в нашей стране (их много было), - все они на каком-то любительском уровне, без государственного финансирования.

В 2000-х годах, когда проблема стала, как говорится, ребром, и выяснилось, что на самом деле имеющиеся источники тепла космические в соответствии с имеющимися проектами имеют мощность от 100 кВт и выше, мегаваттные источники, оказалось, что существующих теплообменников... Как говорится, решить эту задачу невозможно. И тут появился опять некий бум, и вот опять он начался и связан с капельными теплообменниками.

Ситуация сейчас с капельным теплообменником, несмотря на прошедшие годы, она не такая простая. До сих пор есть вопросы, которые на самом деле до конца не решены. И сюда относится каплеобразование. Сюда относится тем более сбор капельного потока, стабилизация капельного потока. Вот тут вопросы были, касающиеся определения тепла капельного потока, - таких экспериментов до сих пор нет, и автор пытался это объяснить. Потому что нужны здесь, на Земле, либо пролётные базы большие, либо большая разница температур.

На данный момент в России всего две таких установки. Есть еще одна в Японии и еще одна, вроде как, в Штатах. И на них, в меру своих возможностей, идут попытки решить эти вопросы. Слава Богу, в результате заинтересованности в 2000 году оказалось, что появилась возможность провести космические эксперименты и часть вопросов снята. Поэтому любые (здесь отражено моё личное мнение), любые работы в этом направлении, то, что сделал автор диссертации, действительно являются актуальными и имеют большую научную новизну. Потому что только решение этих вот вопросов действительно позволило решить проблему сброса тепла. Это вот по поводу актуальности и научной новизны.

Дальше, я не буду зачитывать, что там в диссертации и прочее-прочее-прочее... Там всё достаточно нормально и прочее... Могу только остановиться на том, что на самом деле оценка положительная. Но есть ряд вопросов, которые я задавал диссертанту и надеюсь получить на них ответы.

Первый вопрос у меня выглядит следующим образом. К сожалению, во введении, в обзоре, в котором диссертант попытался найти своё место в исследовательском диапазоне,

в общем поле пытался найти, к сожалению, может по молодости и прочее, так сложилось, что там в основном идут иностранные работы, ссылки на иностранные работы. Хотя, как это еще раз говорю, ни парадоксально, первая работа – это была работа 1972 года, даже патент был получен в МАИ, – это Душкина и Базарова, у которых вопрос, патент связан с тем, что бескаркасных капельный теплообменник должен выглядеть следующим образом. Потом, почему-то, все ссылки идут на Маттика и его работы. Вот, хотелось бы, чтобы такой вопрос был отмечен в диссертации. Так, дальше. (Неразборчиво).

Второе, не только приоритет, но и в обзоре, большая часть была посвящена вещам, связанным с иностранными исследованиями. Их действительно много. Но наших не меньше. Особенно если говорить по поводу каплеобразования и вопросов, связанных с каплеобразованием вязких – не вязких жидкостей.

### **Синкевич О.А.**

И заряженных.

### **Бухаров А.В.**

И заряженных в том числе, да, достаточно много. Они, может быть, чуть в стороне от тех задач, которые попытался решить диссертант, но они все-таки есть. И, опять же, как пожелание, - хотелось бы, чтобы такие ссылки были.

Так, еще есть такая вещь своеобразная. Все-таки, автор показал себя, мое мнение ... Вот третья глава диссертации – она действительно у него такая из себя обширная, хорошая, и прочее. Действительно, с чисто теоретической точки зрения она сделана хорошо и доказательно. А вот вопросы, связанные с экспериментальной установкой и экспериментальным исследованием – ну так, чуть, может быть, из себя похуже. Замечание. Приведена экспериментальная установка. Но, вот, элементы, которые позволяли бы оценить реальные ошибки, - они там не приведены. Раз. Приведена общая ошибка измерения размеров капель порядка пять микрон. Но она, на самом деле, не очень обоснована. Поэтому получается так. Все-таки хотелось бы услышать бы какие были реальные ошибки, это раз. Но даже если эти реальные ошибки оказывались заниженными, а на самом деле они выше, это не противоречит тем результатам, качественным, а результаты эти качественные, которые на самом деле приведены. Опять же, хотелось бы понять какие реально были ошибки.

Ну и последнее. В некотором смысле стандартный пункт всегда, - по поводу небрежности в оформлении диссертации. Ну вот даже сейчас в докладе, например, Онезорге пишется и через  $h$ , и через  $n$ . И вот как оно писать, - лучше было бы остановиться на чем-нибудь одном. В диссертации, если посмотреть, - часть графиков не имеет обозначения оси. Это в некотором смысле тоже такая.

### **Синкевич О.А.**

Засекречен.

### **Бухаров А.В.**

Нет, я не спорю, я и говорю, что всегда есть такие недостатки. Ну, вот основные недостатки отметил. А дальше, все-таки, в заключении – что на самом деле отмеченные недостатки – все равно позволяют вынести положительную оценку, на мой взгляд. (Неразборчиво.) Ну и все достаточно достоверно, результаты, показанные, и есть новизна

и значимость, и на основании этого вот все-таки вот можно рекомендовать присвоить звание кандидата физмат наук по специальности 01.02.05. Спасибо, я всё.

### **Председатель**

Спасибо, Александр Васильевич, за обстоятельный отзыв и сделанные замечания. Может быть, у кого-то возникли вопросы из присутствующих, к официальному оппоненту? Нет вопросов. Тогда спасибо еще раз. Тогда слово предоставляется Андрею Александровичу для ответа на прозвучавшие в отзыве оппонентов замечания.

### **Сафронов А.А.**

Первое, по первенству. Тут только можно согласиться. По второму вопросу. Действительно, в обзоре существует крен на иностранные источники. Он вызван в основном тем, что мы работаем в России и понимаем, какие работы ведутся в России по капельным холодильникам. Нас больше интересует, интересно понять ведутся ли работы за рубежом, если ведутся – то какие. И когда я писал обзор, больше ставил перед собой такую задачу. (Неразборчиво.) Третья часть – по размерам. Как я сказал, в гидросистеме установки существовали шумы, которые приводили к разбросу частиц по размерам значительно больше, чем погрешность измерения оптическим методом. Поэтому измерением погрешности измерений я в работе подробно не занимался. Для определения размеров частиц использовался металлический цилиндр эталонного радиуса. На слайде изображена фотография из видеосъемки этого процесса. Камера была достаточно хорошая, у неё разрешение, если я не ошибаюсь, 2560 точек на 1920. Названная погрешность порядка пяти микрон по сути является размером пикселя. Да, есть некоторая небрежность. Но погрешность в определении размеров частиц не очень была интересна, поскольку существовали другие факторы, которые значительно сильнее обеспечивали погрешность в определении размеров для экспериментальных измерений. А по третьей части - я согласен.

### **Председатель**

Спасибо, Андрей Александрович. Может быть, вопросы еще у кого-то возникли? Если вопросов нет, то тогда слово предоставляется второму официальному оппоненту кандидату физико-математических наук Орлову Денису Михайловичу, Сколковский институт науки и технологии.

### **Орлов Д.М.**

Здравствуйте, уважаемые члены диссертационного совета. Я, наверное, только дополню то, что уже много раз сегодня прозвучало. Прежде всего – свое мнение о работе. Наверное, об этом еще не говорили, но у меня сложилось такое впечатление, что работа очень структурированная, очень содержательная и очень комплексная. Потому что как правило сейчас знакомись с какими-то диссертациями, у них есть какой-то перекосяк. Либо в сторону теоретической составляющей при решении поставленной задачи, либо наоборот – экспериментальный взгляд на проблематику превалирует. Либо работа имеет явно не прикладное значение. Либо слишком много используется каких-то теоретических подходов и методов.

В данной же работе – все более-менее структурированно и гладко, что, несомненно, является большим плюсом. И сам текст диссертации было очень интересно читать – как

детективный роман. Все главы написаны очень хорошо, детально. Связь между ними явно прослеживается. Если говорить по официальной, формальной вещи, которую нужно озвучить, то прежде всего – работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Здесь никаких замечаний и вопросов быть не может. Опубликовано 12 статей, о чем сегодня говорилось. Это и статьи из перечня ВАК, и из систем Web of Science и Scopus. По содержанию работы – наверное, я сейчас не буду говорить: и презентация была исчерпывающая, и в отзывах все основные моменты были обозначены. На чем стоило бы остановиться – это на замечаниях.

Первое замечание, которое я обозначил, – что в первой главе диссертации описывается альтернативный (неразборчиво) способ бесконтактного отвода тепла – пленочный холодильник – излучатель, в отличие от капельного холодильника – излучателя. Но из текста диссертации осталось не ясно чем капельный холодильник – излучатель все-таки лучше пленочного.

Второе замечание – более скрупулёзное, связанное с анализом второй главы. В частности, на рисунке 2.9 приведены результаты расчета зависимости радиуса основных и сателлитных капель от безразмерного волнового числа возмущения для различных значений числа Онезоге. И по этому рисунку в тексте сделаны следующие выводы, требующие пояснений. Прежде всего, желательно пояснить, как выполнены расчеты радиусов основных и сателлитных капель – блок, который был пропущен, сразу приведены выводы.

Второе замечание этого вопроса. В работе говорится, что из рисунка видно, что в области значений чисел Онезоге от 0,2 до 2, образование сателлитных капель наименее вероятно. Тем не менее, на рисунке во всем диапазоне волнового числа и чисел Онезоге приведены рассчитанные значения радиусов основных и сателлитных капель. Если эти значения были рассчитаны, значит имеет место сателлитный режим течения.

И третий момент данного вопроса связан с тем, что из рисунка видно, что результаты расчета радиусов основных и сателлитных капель методом сшивки асимптотического решения и автомодельного решения близки результатам расчета на основе только асимптотического решения. Ну, означает ли это, что для инженерных расчетов можно использовать более простой асимптотический метод решения для прогноза образования сателлитов?

Следующее замечание – заключается в том, что в конце каждой главы не хватает структурированных выводов о том, что удалось сделать, чего удалось достичь по результатам исследования в данном разделе, а чего нет. Например, не совсем ясно, позволяют ли результаты раздела 2 рассчитывать размеры микросателлитов при разрыве струи или нет? (Неразборчиво.)

Следующий вопрос. В диссертации не затронут вопрос влияния переоблучения на формирование капельного потока. Желательно добавить рассуждения об этом в текст диссертации.

Ну и последнее замечание, оно тоже техническое, - нужно поаккуратнее, конечно, относиться к написанию текста диссертации. Там можно найти, конечно, если приглядеться, ряд опечаток и пунктуационных ошибок.

Но в целом все замечания не носят принципиального характера. Как я уже говорил, мое личное впечатление о работе очень хорошее – в целом о работе; о том, что она полностью удовлетворяет критериям высококачественной квалификационной работы, и сам

диссертант Андрей Александрович Сафронов представляет собой специалиста законченного, и достойного присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Ну, вот еще из формальных вещей стоит поговорить об актуальности – что тема диссертации подтверждается выполнением работы в соответствии с перечнем Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ и критических технологий РФ (Указ Президента РФ № 899 от 07.07.2011 г.). Решение новых задач, сегодня об этом говорилось, связанных с использованием космического пространства, предполагает значительное повышение энерговооружённости космических аппаратов. Наиболее проблемной частью их энергетических установок является система отвода тепла, что является предметом данной диссертации. Мы видим, что в данном направлении получены очень полезные, с практической точки зрения в том числе, результаты. Научная новизна также не вызывает сомнений. И разработаны методики расчета различных характеристик теплообмена для систем бескаркасного отвода тепла. Впервые выявлен и теоретически описан режим автомодельного утончения струй ньютоновых жидкостей, влияющий на формирование микросателлитов при капиллярном распаде сильно вязких струй. Если говорить о степени достоверности результатов, то они обоснованы соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований. Хотя и сегодня звучали замечания о том, что не хватает (неразборчиво) космических экспериментов, тем не менее этот вопрос хорошо освещен. Там, где это можно – обосновывается (неразборчиво) применимость методов и теоретических подходов. Ну и, естественно, в качестве степени достоверности результатов можно говорить о том, что результаты расчетов диссертанта хорошо согласуются с результатами расчетов других авторов, работающих в данном направлении.

Полученные автором результаты могут быть использованы в профильных организациях, - несколько слов о практической значимости, занимающихся проектированием элементов и систем ракетно-космической техники. Среди потребителей результатов данной работы могут выступать ПАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени Королева», АО «Конструкторское бюро «Арсенал» имени Фрунзе», «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», и ФГУП Государственный космический научно-производственный центр имени М. В. Хруничева.

В целом диссертационная работа «Исследование процессов формирования капельного потока и радиационного теплообмена в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным пункте 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Сафронов Андрей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы. Спасибо.

### **Председатель**

Спасибо, Денис Михайлович. Есть ли вопросы к оппоненту? Нет вопросов. Тогда слово предоставляется Андрею Александровичу для ответа на прозвучавшие замечания.

### **Сафронов А.А.**

Первое замечание, по поводу пленочных излучателей. Да, действительно, существуют

какие-то проекты этих пленочных излучателей. Но там возникает ряд проблем, в этих проектах. Во-первых, пленка, свободно распространяющаяся, оказывается очень неустойчива к возмущениям. В ней разрывы происходят, которые затем распространяются. Второе, она всегда будет схлопываться. Мы проводили какие-то пробные эксперименты. Мы рассматривали возможности сбора капель распространяющейся пленкой, чтобы они падали на пленку, и собиралась уже пленка. Оказалось, что пленка очень быстро схлопывается, и все равно, есть неустойчивости. Она распадается на очень большие частицы, изменяются условия радиационного остывания, и поэтому пленки не рассматриваются, как правило. Но да, действительно, в работе не отмечено почему они не рассматривались.

По второму развернутому вопросу. По первому пункту. Расчеты размеров проводились интегрированием этой зависимости, радиуса струи от координаты. Вторая часть вопроса. Сателлиты образуются. Разница в том, где граница образования сателлитных капель. При значении числа Онезорге около 0,5, она находится достаточно далеко. И существует обширная область, где сателлиты не наблюдаются. При повышении вязкости граница значительно сдвигается в сторону. По третьему замечанию – можно только согласиться. По остальным замечаниям – согласен.

### **Председатель**

Спасибо, Андрей Александрович. Может быть вопросы какие-то?

Перед тем, как перейти к дискуссии, надеюсь, что она будет короткой и не продолжительной. Пару слов я должен лаконично сказать.

На мой взгляд, сегодня прекрасная работа прозвучала у нас. Почему? Потому что и математику мы здесь видели. И видели то, как человек хорошо чувствует физику. Потому что часто бывает, математика есть, нет физики. И эксперимент мы видели. Но эту работу выделяет то, что практическая направленность здесь просто очевидна, и это очень радует, потому что это не так часто у нас бывает на защитах. И в нашем совете в том числе.

Ну и, естественно, работа – она собирается из комплекса, и квалификация. На мой взгляд, сегодняшнему диссертанту очень повезло. Во-первых, это шикарная база, которую он приобрел в физико-техническом институте. Потом, шикарная организация, где он работает, и, наверное, шикарный коллектив в «Центре Келдыша». Повезло с научным руководителем и так далее, и так далее. Всё тут сошлось как бы, и поэтому у меня вопросов нет. Я буду голосовать положительно, и всех членов совета приглашаю присоединиться к такому решению.

Так, пожалуйста, здесь руки. Кто?

Олег Арсеньевич, все-таки Сергею Гельевичу все-таки представлю я слово.

### **Черкасов С.Г.**

Я как-бы буду выступать от лица организации, где работа делалась. И диссертация, по физике, четко делится на две части. Одна посвящена капиллярному распаду струй в первой части, а вторая – теплообмен в капельном потоке. И я буду говорить только о первой части по двум причинам. Вторую причину я потом озвучу. А первая причина – в том, что когда-то пришлось мне заниматься очень похожими задачами. Мы пытались понять, как будет происходить пленочная конденсация на цилиндрической трубке в условиях невесомости, когда пленка стекать не может. И там, как раз, в сущности та же задача, что и здесь – вопрос об эволюции поверхности, жидкой цилиндрической

поверхности под действием, под влиянием капиллярных сил. И задача оказалась очень сложная. И у меня был такой студент – Ажаев Володя. Он потом на эту тему защитил диссертацию в Чикаго, и руководителем у него был Стивен Девис, который в то время был главный редактор Journal of fluid mechanics, и большой специалист по этим вопросам. Вот, к чему это я говорю. Тема об эволюции цилиндрической поверхности – это огромная тема, и до сих пор, и тогда и до сих пор, больше здесь не изученного, чем изученного. И вот так получилось, что здесь, в диссертации, практика потребовала получить результаты при числах Онезорге порядка единицы, а это как-раз была неизученная область. И вот он взялся за это, и развил здесь и метод, и результаты получил, и сделал, на мой взгляд, прекрасную значит работу. А задача сложная почему? Здесь правильно отмечалось, что это вот уравнение, третьего порядка присутствует, по пространственной координате, и оно не типичное для гидродинамики. Потому что уравнений второго порядка – их полно. И теплопроводности, и Навье-Стокса, и в электродинамике уравнение Пуассона, и все уже свойства их понятны, и как решать их все знают. А вот третьего порядка когда появляется уравнение, тут неизбежно появляются разные вопросы новые, требующие решение. И поэтому новизна, я вот тут хочу подчеркнуть, она не только в результатах физических сидит, но и в некоторых методических вопросах, которые ему пришлось решать, потому что вот тут сидит такая вот необычная математическая модель.

Ну, по поводу результатов физических, я думаю, все здесь понятно. Что он получил. Что результатов много, что они интересные. Поэтому я всё-таки немножко о практической ценности скажу. Вот понимаете, когда в диссертациях когда о практической ценности говорится, обычно вот в таком духе пишут, что полученные результаты в принципе как-нибудь когда-нибудь могут быть применены в практических задачах. Обычно это к диссертациям в физмат-науках относится, в технических обычно все ближе как-то к практике. А здесь ситуация совсем другая. Вот практика поставила совершенно конкретную задачу, и он дал на эту задачу совершенно исчерпывающий ответ. Вопрос в чём? Можно ли создать генератором капель монодисперсный поток? Ответ – да, возможно. Существуют такие режимы, когда поток монодисперсный, но это не единственный режим работы. Тогда второй вопрос – а в какой области этот режим реализуется? Пожалуйста, нашел. То есть с практической точки зрения сделано все, что было можно, уже больше было нельзя. Вот.

Теперь – по поводу. Тут такой момент, который не обсуждался, но, я думаю, его нужно поднять. Причина почему я про эту часть говорю. Вот я считаю, что с общенаучной точки зрения первая и вторая части равноценны. С практической точки зрения – равноценны: и там, и там – важные для практики. Но с точки зрения диссертации. Диссертация должна вносить не просто вклад в науку, а в ту науку, которая прописана на титульном листе под названием специальность. А специальность то – 01.02.05 – гидродинамика. Вот. И с этой точки зрения первая часть идеально подходит под специальность.

### **Синкевич О.А.**

Не гидродинамика, а механика жидкости, газа и плазмы.

### **Черкасов С.Г.**

С этой точки зрения – первая часть, она идеально подходит под специальность.



### **Синкевич О.А.**

Не гидродинамика, механика жидкости, газа и плазмы.

### **Черкасов С.Г.**

Я согласен, условно, для сокращения. Механика жидкости, газа и плазмы. А вот вторая часть – она гораздо меньше вклад дает в механику жидкости, газа и плазмы, чем первая часть. И как в этом случае оценивать? Но я хочу обратить ваше внимание вот на что. Что если взять, на самом деле, первую часть, и рассмотреть её с точки зрения требований ВАК к диссертации, то окажется что она сама удовлетворяет всем требованиям. Там результатов новых – полно, сильных результатов. С практической (неразборчиво). И даже публикаций у него по первой части больше, чем требуется для целой диссертации. Понимаете, вот. И поэтому ...

### **Реплика из зала:**

Уговаривать нас не надо.

### **Черкасов С.Г.**

И поэтому, вот. Я уговаривать вас не буду. Скажу, что диссертация, на мой взгляд, заслуживает положительной оценки. Спасибо.

### **Синкевич О.А.**

Уважаемые коллеги, я долго говорить не буду. Я познакомился с диссертацией, когда мы решали вопрос о соответствии её нашему совету. Поэтому я хотел бы. Тем не менее обзор, мне тоже не очень понравился - за счет того, что целый ряд работ, которых (неразборчиво). Интересная диссертация Аверина по расчету излучения, не знаю, - знаете ли Вы. Она содержит очень важные. Вы ссылаетесь на Домбровского, но у Аверина более серьезные результаты (неразборчиво) в области излучения, в длинноволновой области.

Второе – вот это проблема капельного потока и распространения, на мой взгляд, кроме холодильника, играет роль для целого ряда других задач, в частности для искусственного воздействия на ближнюю атмосферу земли, в том числе использование заряженных капель, на которые наносится заряд (неразборчиво). Я скажу, что в конце 80-х годов мы, вместе с МВТИ зарегистрировали патент (неразборчиво). Я скажу, что один из мощных генераторов монодисперсных капель был создан в МЭИ Шишовым который работал у Хохлова в МГУ, и после смерти Хохлова пришел. Мы работали вместе с ним, и предложили целый ряд идей, как использовать, но это уже другой вопрос, этот генератор, который позже был усовершенствован. Здесь присутствует один из оппонентов, который является одним из продолжателей этого дела.

Поэтому я считаю, что работа содержит все (неразборчиво). Можно было бы проребатирировать с теми решениями, которые. Мне не очень понравилось, что здесь ссылка на это обострение Курдюмова. Ну Вы же, как математик, хорошо понимаете, что особого серьезного в этом обострении. Все зависит от того, какие граничные условия. Это не есть идея самого уравнения, а идея того, как на него воздействовать. А другое нелинейное уравнение – Колмогорова-Пестунова-Фишера, которое приводит к решению типа ударных волн – тоже не менее интересное, чем те спекуляции, которые (неразборчиво). Курдюмов был очень большой популяризатор, и поэтому это очень хорошо известно. Но есть и другие результаты.

Поэтому, я считаю, что работа содержит все, что необходимо, и я собираюсь положительно голосовать, и призываю всех остальных поддержать (неразборчиво).

### **Председатель**

Спасибо, Олег Арсеньевич. Вячеслав Михайлович.

### **Батенин В.М.**

Олег Арсеньевич, вот Ваше выступление и вопросы показывают, что в этой работе есть что обсуждать. И это самое главное. Но я хотел бы обратить ваше внимание на следующее. Наш совет – есть диссертационный совет. Он должен соответствовать требованиям ВАК. (Неразборчиво). Наш подзащитный этим требованиям соответствует. Первое. Он окончил аспирантуру в прошлом году. Я хочу напомнить, что в соответствии с сегодняшним законодательством Российской Федерации, защита диссертации отнюдь не нужна при окончании аспирантуры. Это бессмысленное требование, но оно есть. Он перешагнул это требование, это первый его плюс. Второе. В положении о диссертации написано, что это должна быть квалификационная работа, никаких новых данных не обязательно. Он и это ограничение перешагнул. Так что мы обсуждаем? Я считаю, что безусловно заслуживает наш подзащитный присуждения искомой степени и призываю всех вас голосовать. А поскольку я заседаю в экспертном совете ВАК-а, то я должен сказать, что такого уровня работы – это отнюдь не частые. Спасибо.

### **Председатель**

Спасибо, Вячеслав Михайлович.

### **Синкевич О.А.**

Не часто – потому что вы снизили требования, считаете что она должна быть ...

### **Батенин В.М.**

Так это не мы требования снижаем.

### **Председатель**

Я надеюсь, что никто больше не настаивает на выступлении. Поэтому Вам, Андрей Александрович, предоставляется заключительное слово.

### **Сафронов А.А.**

Спасибо за ваши выступления! Надеюсь, что защищусь.

### **Председатель**

Спасибо за лаконичность.

Нам предстоит выбрать для процедуры проведения тайного голосования счетную комиссию. Счетная комиссия предлагается в следующем, почти стандартном составе: Кобзев Георгий Анатольевич, Климов Анатолий Иванович и Олег Сергеевич Попель. Возражений нет? Мы должны проголосовать. Кто за? Против? Воздержавшихся- нет. *(Счётная комиссия выбирается единогласно)*. Члены диссертационного совета – начинаем голосование. Просьба не отходить, потому что нам надо проект заключения принять. *(Проводится процедура тайного голосования)*.

### **Попель О.С.**

Комиссия оперативно поработала. Оглашаю результаты. Было роздано всего 19

бюллетеней. В урне оказалось 19. Результаты голосования: 19 – «за», все – «за». Не действительных – нет, против – нет. От имени комиссии Вас поздравляю.

### **Председатель**

Кто за то, чтобы утвердить протокол? Кто за? Принято единогласно. (*Протокол счетной комиссии утвержден единогласно*).

Андрей Александрович, поздравляю Вас с блестящей защитой.

Обсуждение проекта заключения. Проекты заключения розданы. (*Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения*). Есть предложение проголосовать за этот документ как за основу. Кто за это предложение? (*Проект заключения принят единогласно*). Единогласно.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.03  
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 03.04.2019 протокол № 5

О присуждении Сафронову Андрею Александровичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование процессов формирования капельного потока и радиационного теплообмена в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе» в виде рукописи по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 28.01.2019г., (протокол заседания № 2) диссертационным советом Д 002.110.03 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](http://jiht.ru), (495) 485-8345), утвержденным приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 15.02.2013 г. № 75/нк.

Соискатель Сафронов Андрей Александрович, 1991 года рождения, в 2014 году окончил Московский физико-технический институт (государственный университет) (141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер. 9).

В 2018 году окончил очную аспирантуру Московского физико-технического института (государственного университета).

Диссертация выполнена в Отделении 6 Государственного научного центра Федерального государственного унитарного предприятия «Центр Келдыша».

Работает инженером отделения 6 ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, академик РАН Коротеев Анатолий Анатольевич, директор Научно-образовательного инновационного центра «Новые космические технологии и наземные высокотехнологичные процессы», Московский авиационный институт (кафедра 208).

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Бухаров Александр Васильевич, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории «Исследовательский центр высоких технологий», ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет МЭИ (НИУ МЭИ) (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14);

кандидат физико-математических наук Орлов Денис Михайлович, старший научный сотрудник Сколковского института науки и технологий (143025, Московская область, Одинцовский район, Новоивановское городское поселение, деревня Сколково, ул. Новая, д. 100)

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс» (г. Самара, ул. Земеца, д. 18) в своем положительном заключении, составленном заместителем генерального конструктора по научной работе, кандидатом технических наук Борисовым Максимом Владимировичем и главным конструктором – начальником отделения 1550 Китаевым Александром Ириковичем, утвержденном первым заместителем генерального директора – генеральным конструктором Ахметовым Равилем Нургалиевичем, указала, что диссертация выполнена на актуальную тему, результаты, полученные лично диссертантом, способствуют расширению области знаний о закономерностях капиллярного распада сильновязких струй и их радиационного остывания. Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в профильных организациях, занимающихся проектированием элементов и систем ракетно-космической техники, таких как ПАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва», АО «Конструкторское бюро «Арсенал» имени М.В. Фрунзе», «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш), ФГУП Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева.

Соискатель имеет 12 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 6 – в изданиях, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и Scopus, более 15 тезисов в сборниках трудов конференций, получено 2 патента:

Основные работы:

1. Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И. Влияние структуры капельной пелены на мощность бескаркасных космических излучателей и эффективность энергетических установок // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 5. С. 817–820.
2. Сафронов А.А. Особенности капиллярного распада струй жидкости при числах Онезорга больше единицы // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. №1. С. 176–185.
3. Сафронов А.А., Филатов Н.И., Коротеев А.А., Бондарева Н.В. Установление температуры в дисперсных потоках бескаркасных систем теплоотвода в космосе // Теплофизика и аэромеханика. 2017. №6. С. 985—988.
4. Григорьев А.Л., Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И. Автомодельные закономерности образования микросателлитов в процессе капиллярного распада вязких струй // Теплофизика и аэромеханика. 2018. №4. С. 599–609.
5. Сафронов А.А., Коротеев А.А., Филатов Н.И. Установление температуры в радиационно остывающем дисперсном потоке при наличии внешнего теплового излучения // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 6. С. 168–174.
6. Safronov A.A., Koroteev A.A., Filatov N.I., Grigoriev A.L. The effect of long-range interactions on development of thermal waves in the radiation-cooling dis-persed flow // Russian journal of nonlinear dynamics. 2018. V. 14. N. 3. P. 343–354.
7. Сафронов А.А. Расчёт максимальной тепловой мощности космического капельного холодильника-излучателя // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. Вып. 65.
8. Коротеев А.А., Нагель Ю.А., Сафронов А.А. Решение краевой задачи для уравнения Пуассона для движущейся заряженной капельной пелены в форме прямоугольного параллелепипеда // Электричество. 2014. № 7. С. 11–16.
9. Коротеев А.А., Нагель Ю.А., Сафронов А.А. Методы расчета закономерностей функционирования генераторов капель и испарения рабочего тела в открытых космических излучательных системах // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2014. № 7. С. 3–9.
10. Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И. Особенности теплового расчета открытых систем отвода низкопотенциального тепла в космосе // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2014. №12. С. 29—33.
11. Бондарева Н.В., Глухов Л.М., Коротеев А.А., Красовский В.А., Кустов Л.М., Нагель Ю.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И., Черникова Е.А. Бескаркасные системы отвода низкопотенциального тепла в космосе: успехи отработок и нерешённые задачи // Известия Академии Наук. Энергетика. 2015. №4. С. 130–142.

12. Бондарева Н.В., Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И., Шишканов И.И. Оптимальные режимы функционирования бескаркасных космических излучателей с кремнийорганическим сверхвысоковакуумным теплоносителем // Известия Академии Наук. Энергетика. 2016. №5. С. 78–90.

13. Коротеев А.С., Коротеев А.А., Нагель Ю.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И. Способ работы капельного холодильника-излучателя (варианты). Патент RU 2532629.

14. Завьялов И.Н., Негодяев С.С., Завьялова Н.А., Михайлов И.М., Шашин И.Н., Автайкин С.В., Сафронов А.А., Григорьев А.Л. Способ работы капельного холодильника-излучателя. Патент RU 2668386.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ведущий научный сотрудник Центра наногетероструктур, д.т.н. В.Н. Коваленко, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26). Отзыв положительный, с замечаниями:

К недостаткам работы следует отнести отсутствие анализа возможности использования обнаруженных волновых явлений для управления энергетическими характеристиками излучателя. Кроме того, ряд интересных результатов, касающихся устойчивости радиационного остывания, получен в рамках подхода к изучению капельной пелены как дискретной среды. Вместе с тем, хотелось бы видеть всесторонний анализ возможности существования этих эффектов и в сплошной среде. Также весьма интересным является упомянутое, но не раскрытое влияние на устойчивость процесса отвода тепла от КХИ факторов деформации капельного потока, в частности, связанных с наличием пространственного электрического заряда, причем не только за счет электризации при истечении из генерирующего устройства, но и за счет воздействия внешнего излучения космического пространства. Последние факторы, переменные по траектории полета, могут быть весьма существенными для свободно распространяющегося в открытом космосе капельного потока диспергированной пелены сверхвысоковакуумных теплоносителей как на основе традиционных жидких диэлектриков, так и принципиально новых рабочих тел для КХИ на основе проводящих ионных жидкостей.

2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук (ВРИО директора, руководитель лаборатории химических проблем энергетики, д.т.н. И.Ю. Кручина, 199034, Санкт-Петербург наб. Макарова, д. 2). Отзыв положительный, с замечаниями:

В качестве недостатка работы следует отметить некоторую разнородность исследуемых явлений, из-за чего главы диссертации выглядят изолированными.

3) ФГБОУ ВО МАИ (НИУ) (профессор кафедры 601 д.т.н., профессор А.В. Ненарокомов, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4). Отзыв положительный, с замечаниями:

Недостатком работы является недостаточно подробное описание параметров работы генератора капельного потока во время проведения экспериментов. В частности, не приведены значения амплитуды акустического поля во внутреннем объеме генератора капель. Несмотря на отмеченное замечание, диссертационная работа заслуживает положительной оценки.

4) МГТУ им. Н.Э. Баумана (доцент кафедры газотурбинных и нетрадиционных энергоустановок, к.т.н., доцент А.Н. Арбеков, (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1). Отзыв положительный, с замечаниями:

1. Отсутствует экспериментальное подтверждение результатов, полученных автором диссертации при численном моделировании радиационного остывания диспергированной пелены.

2. Из представленного в автореферате материала не ясно, каким образом учитываются особенности теплообмена в угловых струях теплоносителя капельного холодильника-излучателя. Кроме того в тексте автореферата имеется ряд положений, сформулированных

не совсем четко, так на стр. 4 это касается радиационного теплообмена вещества низкотемпературных теплоносителей и введенного на стр. 9 термина «толщина струи», который на стр. 12 назван радиусом.

5) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук

(научный сотрудник лаборатории 501, к.т.н. И.А. Шашкова, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32).

Отзыв положительный, с замечаниями:

В работе подробно исследовано развитие гидродинамических неустойчивостей капиллярного течения в тонкой перетяжке, соединяющей зародыши капель. Однако не приведены ни расчеты, ни экспериментальные измерения скорости движения образовавшихся микросателлитов относительно основных капель. Кроме того, не исследовано взаимодействие микросателлитов с образовавшимися каплями большого размера и не дан ответ на вопрос: будет ли происходить процесс коагуляции частиц, или же они упруго отразятся после столкновения.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- д.т.н. Бухаров А.В. является одним из ведущих ученых в области исследования теплофизических проблем получения стабильных капельных потоков с минимальным разбросом по скорости и размерам капель.

1. Бухаров А.В., Дмитриев А.С. Криогенные корпускулярные мишени в энергетике : [монография] / А.В. Бухаров, А.С. Дмитриев. Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ "МЭИ"). – М.: Изд-во МЭИ, 2013. – 143 с. SBN 978-5-7046-1419-7.

2. Bukharov A., Buescher M., Gerasimov A. Dynamics of Cryogenic Jets: Non Rayleigh Breakup and Onset of Non-Axisymmetric Motions // Phys. Rev. Lett. 100:174505, 2008.

3. Technical design report for the PANDA (Anti Proton Annihilations at Darmstadt) Straw Tube Tracker / W. Erni, I. Keshelashvili, A. Aab, A. Boukharov et al. // The European Phys. J. 2013. V. 49. No 2. P. 25.

- к.ф.-м.н. Орлов Д.М. является признанным специалистом в области моделирования течения газа и плазмы применительно к задачам аэродинамики летательных аппаратов, а также к задачам течения жидкости через нестационарные дисперсные среды.

1. Б.А. Григорьев, А.Е. Рыжов, Д.М. Орлов, Н.В. Савченко, А.П. Федосеев Особенности фильтрационного течения через нестационарные дисперсные среды, представленные засолоненными терригенными породами-коллекторами // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2014. № 2 (18). С. 90-97.

2. Аульченко С.М., Замураев В.П., Знаменская И.А., Калинина А.П., Орлов Д.М., Сысоев Н.Н. О возможности управления трансзвуковым обтеканием профилей с помощью подвода энергии на основе наносекундного разряда типа «плазменный лист» // ЖТФ. 2009. Т. 79. № 3. С. 17-27.

3. Орлов Д.М., Рыжов А.Е., Перунова Т.А. Методика определения относительных фазовых проницаемостей по данным нестационарной фильтрации путем совместного физического и компьютерного моделирования // ПМТФ. 2013. Т. 54. № 5. С. 119-128.

Выбор «Ракетно-космического центра «Прогресс» в качестве ведущей организации обусловлен тем, что АО «РКЦ «Прогресс» – ведущее российское предприятие и один из лидеров мировой космической отрасли в области разработки, производству и эксплуатации ракет-носителей среднего класса. АО «РКЦ «Прогресс» является крупным отечественным предприятием по разработке космических аппаратов научного и прикладного назначения, многие из которых не имеют аналогов в мире.

1. Абрашкин В.И., Воронов К.Е., Дорофеев А.С., Пияков А.В., Пузин Ю.Я., Сазонов В.В.,

Сёмкин Н.Д., Филипов А.С., Чебуков С.Ю. Определение вращательного движения малого космического аппарата «Аист-2Д» по данным научной аппаратуры КМУ-1 // Космические исследования. 2019. Т. 57. № 1. С. 61 – 73.

2. Богданович В.И., Ломовской О.В., Зотов Е.А., Небога К.В., Гиорбелидзе М.Г. Оценка технологичности трубопроводов пневмогидравлической системы подачи ракеты-носителя // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2018. №1. С. 144 – 152.

3. Зайцев В.В., Карлов А.В., Федюнин Э.Ю. О генерации третьей гармоники автоколебаний в схемах Хартли и Мейснера // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21. № 2. С. 26 – 29.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- создан метод расчёта капиллярного распада вязких струй теплоносителей, потенциально пригодных для использования в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе; показано хорошее соответствие результатов численного расчёта с экспериментальными данными;
- разработана модель образования микросателлитов в процессе капиллярного распада сильновязких струй;
- сформулированы рекомендации по определению оптимальных параметров работы генераторов капель бескаркасных космических излучателей;
- создан универсальный метод расчёта радиационного теплообмена в дисперсном потоке капельного холодильника-излучателя;
- разработана методика расчёта кинетических коэффициентов переноса излучения в капельном потоке;
- установлены закономерности нестационарных процессов радиационного остывания диспергированной капельной пелены;
- сформулированы рекомендации по проектированию оптимальной геометрической структуры капельного потока.

Научная значимость исследования обоснована тем, что:

- разработана методика расчета процесса вынужденного капиллярного распада струй вязких жидкостей в области значений числа Онезорге порядка единицы; определены зависимости размеров основных и сателлитных капель от волнового числа инициирующего распад возмущения для различных значений числа Онезорге;
- проведено экспериментальное измерение размеров основных и сателлитных капель; подтверждено соответствие полученных результатов с расчётными;
- впервые выявлено наличие режима автомоделного утончения струй ньютоновых жидкостей, влияющего на формирование микросателлитов при капиллярном распаде вязких струй; разработана физико-математическая модель соответствующего процесса;
- разработана методика расчета кинетических коэффициентов переноса излучения в структурированном капельном потоке низкопотенциального капельного холодильника - излучателя;
- получены аналитические зависимости, описывающие поле температуры в капельной пелене низкопотенциальных капельного холодильника – излучателя;
- выявлены закономерности распространения тепловых волн в радиационно остывающих дисперсных потоках. Разработана физико-математическая модель волновых процессов, сопровождающих процесс распространения тепловых волн.

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

- Разработан вычислительно-программный комплекс, позволяющий численно моделировать процесс вынужденного капиллярного распада струй вязких жидкостей при значении числа Онезорге, близком к единице. Выявленные закономерности образования микросателлитов в процессе капиллярного распада струй позволяют определять области параметров, в которых процесс вынужденного капиллярного распада происходит без образования сателлитных капель.

- Разработан вычислительно-программный комплекс, позволяющий численно моделировать процесс радиационного остывания капельного потока низкопотенциального капельного холодильника-излучателя. Создана база данных, содержащая информацию об остывании капельных потоков с различной структурой, размером частиц и теплофизическими характеристиками рабочего тела. База данных позволяет определять оптимальных геометрических параметров бескаркасных космических излучателей.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- результаты получены на сертифицированном оборудовании, показана воспроизводимость результатов исследования;
- расчетно-теоретические исследования построены на известных, проверяемых данных, фактах, общепризнанных законах технической термодинамики, физической химии и теплофизики. Они согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;
- идея диссертационной работы базируется на анализе научно-технической литературы по предметной области исследования, обобщении опыта работы других научных групп, лабораторий и технологических компаний;
- установлено качественное совпадение авторских результатов и представлений с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

Личный вклад соискателя в получении научных результатов диссертации является определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. А.А. Сафроновым разработана методика расчёта капиллярного распада вязких струй теплоносителей, потенциально пригодных для использования в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе. При его непосредственном участии проведены экспериментальные исследования, показавшие соответствие результатов численного расчёта с экспериментальными данными. Автором разработана физико-математическая модель образования микросателлитов в процессе капиллярного распада сильновязких струй. А.А. Сафронову принадлежит определяющая роль в разработке универсального метода расчёта радиационного теплообмена в дисперсном потоке капельного холодильника-излучателя. Автором диссертации лично разработана физико-математическая модель нестационарных процессов радиационного остывания диспергированной капельной пелены. При непосредственном участии А.А. Сафронова сформулированы рекомендации по проектированию оптимальной геометрической структуры капельного потока. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены лично автором.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании от 03.04.2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Сафронову А.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 6 докторов наук по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы и 13 докторов наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, участвовавших в заседании из 25 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 19, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета Д 002.110.03

чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.03

д.т.н.

Вараксин А.Ю.

Директор Л.Б.

03.04.2019 г.

