

Отзыв на диссертацию Мокрина Сергея Николаевича «Пределы горения бедных смесей газов во встречных потоках», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Сергея Мокрина посвящена исследованию процесса горения во встречных потоках топливно-воздушных смесей газов с целью изучения возникающих структур пламени, их динамических свойств и пределов существования. Стоит особо подчеркнуть, что данное исследование проведено максимально подробно и всесторонне – автором получены теоретические результаты по структуре стационарных решений и их линейной устойчивости, проведен прямой численный расчет предложенной многомерной модели в двумерной и трехмерной постановках, а также проведены экспериментальные наблюдения и измерения на установке собственной конструкции. Работа в целом производит очень хорошее впечатление.

Фундаментальные исследования процессов горения газов остаются актуальными несмотря на многолетний накопленный опыт. В особенности это касается околопредельных режимов, характеризующихся сложными динамическими и структурными свойствами пламени. Определение пределов горения было и остается одной из наиболее значимых с практической точки зрения проблем в связи, например, с проблемами безопасности. Сложная динамика околопредельных режимов также представляет большой интерес для общей теории горения.

В диссертации поставлены и решены следующие задачи, все имеющие своей целью исследование роли различных факторов, таких как растяжение потока, тепловые и радиационные потери, термодиффузионные свойства, на процесс горения во встречных потоках заранее перемешанных горючих газов:

1. В главе 2 сформулирована математическая модель для горения во встречных потоках и проведен её анализ на существование стационарных одномерных решений и на линейную устойчивость таких решений по отношению к двумерным возмущениям. Двумерный анализ устойчивости этой системы проделан впервые.
2. В главе 3 проведен численный расчет многомерных структур волн горения, стабилизированных в плоском канале между двумя противоточными горелками. Обнаружены, в зависимости от параметров задачи, различные режимы горения, такие как плоские и ячеистые пламена, а также структуры в виде трубок пламени. Эти предсказания находятся в качественном согласии с экспериментальными наблюдениями как в литературе, так и в данной работе.
3. В главе 4 получены данные по пределам горения как экспериментально, так и теоретически с помощью линейного анализа на устойчивость и прямых численных расчетов. Важным результатом данной главы является проведенная экспериментальная работа по исследованию различных режимов горения в плоской противоточной горелке, а также построение математической модели таких пламен, которая позволила выяснить механизмы различных наблюдаемых режимов. Установлено, в частности, что гашение пламе-

ни на разных частях кривой пределов горения, выраженной через зависимость коэффициента растяжения потока от коэффициента избытка топлива, обусловлено растяжением пламени на верхней части кривой, радиационными и конвективными потерями в середине и рециркуляцией/отводом тепла к горелке на нижней части. Относительно простая математическая модель, построенная автором, позволила выявить эти механизмы и качественно обосновала ε -образную форму кривой пределов на плоскости растяжение/состав смеси.

Среди новых результатов, полученных автором, укажем на двумерный анализ линейной устойчивости растяженных пламен, прямой 2D/3D численный расчет многомерных структур пламен, возникающих во встречных потоках, анализ горения в плоском канале со встречными потоками с учетом потерь тепла в стенки канала и, наконец, создание новой экспериментальной установки, на которой были получены все представленные в диссертации экспериментальные результаты.

Основные выводы автора по полученным результатам можно считать вполне обоснованными, так как они основаны на всестороннем анализе рассматриваемых явлений, включающем в себя численный и физический эксперименты, а также теорию, основанную на анализе математической модели в виде системы уравнений в частных производных, описывающих горение с учетом конвекции с заданным полем скоростей, диффузии тепла и вещества, тепловыделения в результате химических реакций, потерь на излучение и теплопередачи в стенки канала. Указанные подходы дают результаты, которые находятся в качественном согласии между собой. Необходимо отметить, что математические модели, на которых основан приведенный в диссертации анализ, представляют собой некоторую идеализацию и имеют своей целью предсказать скорее качественные, чем количественные характеристики изучаемых явлений. Например, рассматривается упрощенная одноступенчатая кинетика, свойства газа считаются постоянными и т.д. Но, на мой взгляд, это правильный подход, так как он позволяет выявить наиболее существенные факторы, влияющие на механизмы явлений и отбросить все второстепенное. Автору такой подход позволил разобраться в механизмах наблюдаемых явлений. В частности, понять происхождение ε -образной (в отличие от более известной S -образной) кривой пределов существования пламен, стабилизированных в канале, как имеющей своей первопричиной рекуперацию тепла через стенки канала. Это подтверждается расчетами в последней главе диссертации в разделе 4.2.2, в которой делаются важные выводы о различных механизмах гашения пламен.

Достоверность результатов основывается на качественном согласии теоретических предсказаний и экспериментальных наблюдений. Кроме того, результаты опубликованы в ряде серьезных научных журналов и, таким образом, прошли рецензирование в международном экспертном сообществе. В том, что касается численных расчетов, автор провел необходимый анализ влияния расчетной сетки на результаты. Несмотря на то, что такой анализ проведен недостаточно подробно на мой взгляд (не приводятся зависимости относительной ошибки от размеров расчетной ячейки; не продемонстрирован порядок сходимости; не показана численная устойчивость метода), тем не менее качественно, по всей видимости, численные расчеты показывают правильные результаты. Для экспериментальных измерений автором учтены необходимые погрешности измерений.

В целом работа написана хорошо и по научному содержанию существенных замечаний нет, но, тем не менее, имеется ряд замечаний технического характера.

1. В тексте нередко отсутствуют в нужных местах ссылки на работы, из которых взяты те или иные результаты или формулировки моделей. Например, схема противоточной горелки на рис. 1.1 взята из работы [16], а фотография на рис. 1.2, которая обсуждается в той же части текста, неясно откуда взята. Возможно, автор сам сделал эту фотографию, но в той части, где приводится обзор литературы, указание на источник, на мой взгляд, должно присутствовать. В том, что касается моделей (например, 2.1.1-2.1.3) также следует указать на первоисточник. Понятно, что такие модели исследовались многократно и другими авторами и на данный момент являются достаточно общепринятыми, но отсутствие ссылок создаёт впечатление (ложное), что модель предложена впервые автором. Рис. 1.3 на стр. 17 – он получен автором или взят из работы [29]? Из текста на предыдущей странице можно подумать, что график взят из [29]: “Механизм реакции, использованный в работе [29] при расчете графиков на Рисунке 1.3,...”. В таком случае необходимо дать ссылку на [29] под рисунком. Такие же замечания можно сделать и по ряду других рисунков, на которых должно быть четко указано, кому принадлежат результаты. Кем получены экспериментальные данные на рис. 1.5? В тексте над Рис. 1.5 написано “Измеренные критические параметры растяжения... показаны на рисунке 1.5”. Если измерения проведены автором, то необходимо написать “Измеренные автором критические параметры...”. Иначе указать того, кто измерил.
2. Стр. 16: Неполное предложение: “Из Рисунка 1.3 видно, что два предельных значения параметра растяжения.”
3. Стр. 24-25. В формулировке математической модели в виде уравнений в частных производных кроме самих уравнений должны присутствовать начальные и краевые условия. Было бы полезно это сделать сразу после уравнений (2.1.1-2.1.3). В решении (2.1.4) у функции $I^-(\zeta, nH)$ не определен n . В предложении после (2.1.6) $\text{erf}(\zeta)$ названа “функцией ошибки”. Правильно – “функция ошибок”.
В целом решение задачи в этой части указано слишком кратко. Например, (2.1.8-2.1.10) появляются довольно неожиданно без каких-либо объяснений. Это не было бы проблемой, если бы такие объяснения можно было найти в ранее опубликованных работах, но в таком случае необходимо привести ссылки на эти работы ([36]?). Ниже в этой же части обсуждаются результаты, приведенные на рис. 2.1.2 и утверждается, что они хорошо согласуются с работами [26,27]. В чем конкретно это согласие выражается, мне не очевидно. Возникает еще вопрос по модели – в [26,27] использовалась такая же модель или другая? Если такая же, то необходимо перед (2.1.1-2.1.3) дать ссылку. Если есть отличия, то на чем основано сравнение? Все эти и подобные вопросы возникают по причине недостаточно подробного описания теории и результатов в разделе 2.1 или отсутствия необходимых ссылок на литературу в нужных местах.
4. Стр. 29-34. Так же, как и в предыдущем случае, описание модели является довольно кратким, но в данном случае указана ссылка на работу [36], где

проведен похожий анализ для одномерных возмущений. Тем не менее, некоторые детали могли бы помочь читателю с пониманием текста. Например, при линеаризации модели выпала δ -функция, но её присутствие в исходной системе должно проявиться в линейной задаче через условия на фронте пламени. Они не приведены. Дисперсионное соотношение (2.2.3) должно связывать Ω с k и набором параметров задачи. В (2.2.3) все еще присутствует x , чего не должно быть (по всей видимости, должно быть написано x_f^S вместо x).

5. Рис. 2.2.3. На этом рисунке приводятся области существования различных режимов в зависимости от характера неустойчивости, выявленного в результате линейного анализа. Обоснование плоских, пульсирующих и ячеистых пламён достаточно понятно, а что из себя представляет “неустойчивое низкоскоростное горение” не совсем ясно. Какие-то комментарии автора по этому вопросу были бы полезны.
6. Раздел 3.2. Пропущены некоторые детали численного метода. Например, дискретизация второго порядка по пространству может быть разной, не указано, какая использовалась.
7. Стр. 58. В названии главы 4 допущена опечатка в слове “растяженных”. Имеются и другие опечатки, которые автору следует исправить.
8. Рис. 4.1.3. Наличие значительных расхождений между пределами горения, полученными в данной работе, и в работах других авторов, как показано на рис. 4.1.3, требует объяснения или хотя бы какого-то обсуждения. Автор полагает, что потоки тепла и трение со стенками канала могут быть возможными причинами расхождений. Это в какой-то степени подтверждается расчетами в разделе 4.2 в том, что касается формы кривой. Но остается вопрос об абсолютном расположении точек, которые сильно различаются.
9. В модели, представленной в разделе 4.2.1, на мой взгляд, следует сразу указать, что потери тепла из стенок во внешнюю среду не учитываются. Об этом сказано в самом конце на с. 81, но лучше было бы в начале, сразу после формулировки уравнений, так как отсутствие такого члена заметно сразу.
10. Для нестационарных задач условие симметрии (4.2.5) является ограничением. Симметрия самой (физической) системы не означает, что решения будут обладать такой же симметрией. Она может быть нарушена в результате неустойчивостей.
11. В конце с. 77 указано на “возможность существования колебаний пламени ($Re(\omega) > 0, Im(\omega) = 0$). Должно быть $Im(\omega) \neq 0$.

Все указанные замечания не умаляют достоинств полученных автором новых научных результатов, которые, на мой взгляд, вносят значительный вклад в понимание достаточно трудных вопросов теории горения газов в околопредельных режимах. Еще раз хочу подчеркнуть, что в работе присутствует и хорошая теория, включая теорию устойчивости, и численный эксперимент, включая достаточно

сложные многомерные расчеты, и физический эксперимент на новой установке, созданной самим автором. Такой всесторонний подход к исследованию является несомненной сильной стороной данной диссертации и указывает на очень высокую квалификацию автора.

По полученным результатам автором опубликованы семь статей в рецензируемых журналах и материалах конференций, а также получен один патент на изобретение. Среди журналов, в которых опубликованы работы автора, имеются авторитетные международные журналы Combustion and Flame (1 статья) и Proceedings of the Combustion Institute (2 статьи). Высокий уровень проведенных исследований позволяет мне рекомендовать автора к присуждению ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.13.

Официальный оппонент:

Касимов Аслан Рамазанович, Ph.D., доцент

Центр по энергопереходу

Сколковский институт науки и технологий

Москва, Большой бульвар, д. 30 стр. 1, 121205

email: a.kasimov@skoltech.ru

Касимов А.Р.

Дата: 22.02.2023



Я, Касимов Аслан Рамазанович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Мокрина Сергея Николаевича, и их дальнейшую обработку.

Подпись Касимова А.Р. подтверждаю.

РУКОВОДИТЕЛЬ ОТДЕЛА
КАДРОВОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ
ГУК О.С.

