

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Семенова Олега Юрьевича «Исследование релаксационного распространения пламени в каналах», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация Семенова О.Ю. посвящена экспериментальному исследованию динамики и структуры пламени в предварительно перемешанной газовой смеси углеводородов и воздуха. Имеющиеся экспериментальные данные и теоретические сведения о релаксационных колебаниях, возникающих в каналах, недостаточны для исчерпывающего понимания физических механизмов и условий, определяющих возникновение и характер автоколебаний, структуру «тюльпанообразного» пламени и ряд других эффектов. В частности, нельзя считать вполне изученным влияние концентрации горючей компоненты, видимой скорости распространения пламени, степени заполнения канала горючей смесью, местоположения точки воспламенения газовой смеси относительно закрытого конца канала и др. факторов. В то же время проблема непосредственно связана с эффективностью (повышением полноты сгорания топлива и КПД) двигателей внутреннего сгорания, в которых фронт пламени может распространяться в условиях взаимодействия с одним или более поршнями, а также стенками камеры сгорания различной геометрии, при наличии одного или более источников воспламенения. Эти исследования важны также для управления горением в ракетных двигателях, предотвращения помпажа в нагнетательных трубопроводных системах и распространения пожаров. Тем самым, избранная тема диссертационной работы является актуальной.

В диссертации дан достаточно полный обзор современного состояния исследований по теме работы. Приведенный список цитированной отечественной и зарубежной научной литературы включает все источники заимствования автором материалов или отдельных результатов.

В диссертационной работе представлены и обобщены новые экспериментальные данные, полученные автором. В частности, проанализированы условия возбуждения релаксационных колебаний в полуоткрытой трубе и построена диаграмма в плоскости безразмерной координаты точки воспламенения горючей смеси и безразмерной видимой скорости распространения фронта пламени; определен интервал безразмерных критериев подобия (Re , Fr), в котором наблюдаются такие эффекты, как периодическая

Вх. № 31016
ПОСТУПИЛ В ТГУ
* 23 * 05 * 2014

азимутальная неоднородность структуры «тюльпанообразного» пламени и движение поршня навстречу фронту пламени в канале, закрытом с одной стороны. В соответствии со спецификой изучаемого объекта разработана методика экспериментальных исследований, которая в основном заключается в визуализации и высокоскоростной регистрации светящейся зоны пламени, последующей обработке и анализе полученных видеоизображений. Ряд используемых приемов получения данных отличается оригинальностью и обеспечивает возможность наблюдения новых интересных эффектов, упомянутых выше (а также свидетельствует о высоком уровне квалификации автора-экспериментатора). При обосновании обобщений полученных экспериментальных данных в диссертации приводятся выкладки и оценки на основе простых математических моделей, в том числе оригинальных и заимствованных у других авторов.

Среди полученных результатов, обладающих научной новизной, можно выделить следующее:

а) впервые получен и исследован режим возникновения автоколебаний газа и поршня при распространении пламени от закрытого торца канала, характеризующихся сдвигом фаз, что выражается в периодическом смещении поршня навстречу движению пламени;

б) показана возможность формирования многогранной структуры «тюльпанообразного» пламени при релаксационных колебаниях в полуоткрытой трубе, определена область безразмерных критериев подобия, в которой наблюдается данный эффект, предложено объяснение на основе избирательной диффузии недостающей компоненты смеси в радиальном и осевом направлениях;

в) определен качественный характер взаимодействия встречных фронтов пламени, в том числе – в каналах сложной формы при различном расположении точек воспламенения.

Несмотря на наглядность изучаемых эффектов и простоту методики наблюдений, в теоретическом отношении исследуемые процессы весьма сложны, поскольку они определяются одновременно многими физическими механизмами различной природы (тепловыделение реакции, конвективный и молекулярный теплоперенос в газе, межфазный обмен импульсом и энергией, температурная зависимость параметров, эффекты плавучести и инерции, неустойчивость, пространственная неоднородность и др.). Такая многопараметричность и сложность задачи резко ограничивает возможности

теоретического описания. Соответственно, в работе не формулируются замкнутые математические модели и не представлены строгие аналитические или численные решения. Приводимые автором аналитические зависимости по большей части основаны на заимствованиях и аналогиях. Тем самым, достоверность и применимость приводимых в диссертации формул ограничивается уровнем качественного описания и оценок по порядку величины. Поскольку работа носит экспериментальный характер, то и достоверность основных результатов, выносимых автором на защиту, определяется обоснованностью постановки и уровнем методического обеспечения проведенных экспериментов. Следует признать, что выводы, сделанные на основе полученных экспериментальных данных (как и сами результаты измерений), в целом не вызывают сомнений. Постановка экспериментов исключает неоднозначность физической интерпретации собранного материала по визуализации фронта пламени. Основная количественная информация получена из обработки цифровых видеоизображений с пространственным и временным разрешением, обеспечивающим достаточно низкую погрешность определения координат и скоростей. В ряде случаев к снижению точности, очевидно, могла приводить известная условность определения координаты искривленного фронта пламени. Однако влияние подобных факторов минимизировалось благодаря набору статистики при хорошей воспроизводимости результатов. Наряду с этим, достоверность представленных экспериментальных результатов подтверждается также сопоставлением с известными данными других авторов.

По содержанию и оформлению диссертации следует сделать ряд замечаний:

1. При составлении отзыва оппонент вынужден был получить от автора дополнительные уточнения и разъяснения по ряду вопросов, возникающих из-за нечеткости некоторых формулировок. В результате это позволило достаточно полно разобраться в содержании выполненной работы.

2. По мнению автора, «причиной «парадокса», заключающегося в движении поршня навстречу фронту пламени, является сдвиг фаз колебаний фронта пламени и поршня» (стр. 68). Это положение выносится автором на защиту в качестве обоснования физических механизмов, управляющих характером взаимодействия фронта пламени с поршнем (стр. 10 п. 4-6). Следует признать, что сдвиг фаз колебаний не может рассматриваться в качестве причины наблюдаемого встречного движения пламени и поршня, поскольку сдвиг фаз – это количественная характеристика самого эффекта.

Причина же, по-видимому, заключается в инерционности поршня. В той или иной степени на характер колебаний оказывают влияние также такие факторы, как скорость распространения пламени по горючей смеси и тепловыделение реакции, протекание газа через узкий зазор между поршнем и стенками канала, трение между поршнем и стенками канала, теплообмен с окружающей средой... Автор обращает внимание на подобные факторы, но, к сожалению, не проводит необходимого анализа комплекса этих механизмов, поэтому объяснение причины обнаруженного эффекта остается за рамками диссертации.

3. Не все количественные результаты, о которых сообщается в диссертации, подкреплены соответствующими экспериментальными данными, приводимыми в тексте. Например, на рисунке 3.5 (стр. 56) представлена последовательность видеоизображений пламени с указанием соответствующих моментов времени. По этим изображениям можно оценить среднюю видимую скорость фронта ($\sim 3\div 4$ м/с). Тогда при длине трубы 1,5 м весь процесс должен занять время менее 0,5 с. Тем не менее, на стр. 55 сообщается (со ссылкой на рисунок 3.5), что частота колебаний ведущей точки фронта пламени составляет примерно 1 Гц. В данном случае можно предположить, что автор проводил серию экспериментов, подтверждающих сделанный вывод, но эти результаты, к сожалению, не приведены в тексте диссертации.

4. Ряд заимствованных теоретических результатов, используемых в диссертации, и собственных выкладок автора недостаточно обоснованы с точки зрения их применимости к конкретным условиям эксперимента. Например, при выводе формулы (4.11) для частоты колебаний газа в полуоткрытой трубе (в том числе – с поршнем) автор считает процесс изотермическим (стр. 85 и стр. 48), что явно противоречит физическим основам, согласно которым значительное изменение замкнутого объема газа (совершение работы) сопровождается значительным изменением его температуры. Использование решений других задач без необходимого обоснования их физической аналогии с исследуемыми явлениями встречается в диссертации, например, на стр. 84 (формула (4.8)), на стр. 68 (сдвиг фаз $\pi/4$).

5. В Заключении не все пункты сформулированы достаточно четко, в частности, в пункте 5 не указано, какие именно «получены новые экспериментальные данные...», как следствие, не ясно, чем этот пункт Заключения отличается, например, от пунктов 2–4.

6. Из текста диссертации не понятно, как между собой согласуются результаты, представленные на рисунках 3.1 (стр. 52) и 3.3 (стр. 54).

7. Обозначения на вертикальной оси графика, приведенного на рисунке 3.10 (стр. 61), не позволяют получить количественную информацию о динамике пламени и поршня.

8. В тексте разные физические величины зачастую обозначены одинаковыми символами, что затрудняет восприятие, например: коэффициент расширения продуктов сгорания (стр. 48) и ускорение поршня (стр. 33); относительная величина зазора (стр. 49) и «яркость изображения» (стр. 42).

9. В тексте диссертации встречаются опечатки содержательного характера, например: написано 10^{-4} Па, а должно быть 10^4 Па (стр. 19); сказано «определяется динамическим запаздыванием поршня от элементарного объема газа, которое равно максимальному ускорению поршня» (стр. 36); написано «силы вязкого трения», вместо «силы инерции» (стр. 42); в формуле (4.11) потерян размерный множитель при массе поршня (стр. 85); на рисунке 4.1 на вертикальной оси должно быть указано A_f (вместо A_s); неверно указан номер ссылки [56] (стр. 19).

10. В тексте встречаются неоправданные повторы, а также пропуски частей фраз (например, на стр. 73 и 76).

Несмотря на сделанные замечания, основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются в достаточной степени обоснованными.

Диссертация Семенова О.Ю. «Исследование релаксационного распространения пламени в каналах» является научно-квалификационной работой, написанной автором самостоятельно и обладающей внутренним единством. Диссертация содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствующие о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертационной работе содержится решение задачи, имеющей значение для развития механики реагирующих сред. В диссертации приводятся рекомендации по использованию научных выводов. Предложенные автором диссертации решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 17 печатных работах (в том числе – в соавторстве), включая не менее двух статей в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК. Результаты неоднократно обсуждались на различных конференциях и прошли достаточную апробацию.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, правильно и достаточно полно отражает основные полученные результаты.

Диссертация соответствует критериям, установленным действующим Положением о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор – Семенов Олег Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

20 мая 2014 г.

Заместитель директора ИТ СО РАН
по научной работе д.ф.-м.н., доцент

Шарыпов О.В.

