

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Евгения Юрьевича Шадрина «Исследование структуры вихревых и многофазных потоков применительно к перспективным технологиям тепловой энергетики», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы.

В настоящее время одним из основных источников энергии остается угольное топливо. Чтобы соответствовать современным стандартам, технологии сжигания такого топлива должны быть не только энергоэффективными, но и обеспечивать низкий уровень токсичных выбросов. Для разработки таких технологий требуется изучение многих взаимосвязанных процессов: формирование пространственной структуры турбулентного реагирующего потока; тепло- и массообмен; смесеобразование, воспламенение и сгорание топлива. Эти процессы служат предметом многочисленных современных исследований, среди которых можно выделить как перспективные те, в которых используются вихревые течения в камере сгорания. Работа соискателя как раз из этого ряда. Таким образом, **актуальность темы диссертации Е.Ю. Шадрина не вызывает сомнений**. Выбор темы соответствует решениям Совета по приоритетному направлению Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии» (протокол заседания Совета № 145 (4)).

Целью работы является экспериментальное исследование структуры сложных турбулентных потоков в изотермических моделях энергетического оборудования. Проведение в лабораторных условиях комплексных экспериментальных исследований потоков на примере вихревых камер сгорания и пневматической форсунки для распыления водоугольной суспензии является необходимым этапом моделирования процессов при создании полномасштабных устройств. Результаты таких исследований, выполненных на передовом методическом уровне, вносят вклад в развитие механики вихревых и многофазных потоков. Соискатель избрал себе достойную цель.

Представленная на отзыв диссертация изложена на 108 страницах, содержит 55 рисунков и 2 таблицы, состоит из введения, 3-х глав, заключения и 2-х приложений. Список литературы содержит 104 источника. По теме диссертации опубликовано 34

работы, включая статьи в ведущих рецензируемых научных журналах (из них 11 — в изданиях, рекомендованных ВАК), получен патент РФ.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи работы, используемые методы исследования, кратко описаны основные научные результаты, охарактеризована их научная новизна, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** описаны основные методы сжигания угольного топлива, представлено современное состояние исследований. На основе анализа отечественных и зарубежных источников по теме диссертации отмечена недостаточность имеющейся научной информации, полученной в основном с использованием устаревших методов диагностики потоков (особенно многофазных), значительно уступающих по точности и производительности современным оптическим методам. Представленный обзор подтверждает актуальность выбранной темы, позволяет автору аргументированно сформулировать задачи работы и выбрать методы их решения.

Глава 2 посвящена описанию созданного экспериментального стенда и лабораторных моделей энергетического оборудования, применяемых методик измерений поля скорости турбулентных закрученных течений, структуры и дисперсного состава газокапельных потоков. Исследования проведены на моделях вихревых камер сгорания различных конструкций, а также с использованием пневматической вихревой форсунки для распыления водоугольной суспензии. Управление экспериментом автоматизировано.

По результатам этой главы можно заключить, что автор — умелый экспериментатор, хорошо знакомый с современной техникой.

В **главе 3** представлены результаты проведенных экспериментальных исследований внутренней аэродинамики изотермических моделей вихревых камер сгорания: распределения компонент средней скорости и турбулентных пульсаций; пространственная структура закрученного течения при различных режимных параметрах; характеристика газокапельного потока, формируемого пневматической вихревой форсункой для распыления водоугольной суспензии. Подробные данные получены в широком диапазоне режимных параметров, что позволяет использовать их для верификации математических моделей и валидации результатов расчётов при проведении полномасштабного численного моделирования. Приведены примеры сопоставления измерений и расчётов.

Представленные данные убедительно показывают, что намеченные автором задачи решены успешно.

В **заключении** кратко изложены главные достижения автора и основные результаты диссертационного исследования. Показано, что заявленные автором цели достигнуты.

Основная **научная новизна** заключена в результатах детального исследования внутренней аэродинамики различных моделей камер сгорания и характеристик газокапельного потока при распылении водоугольной суспензии пневматической форсункой. Особенно стоит отметить, что на основе полученных результатов предложены оригинальные способы управления структурой вихревого течения за счёт распределённого ввода потока в камеру сгорания, которые защищены патентом РФ.

Диссертационная работа Е.Ю. Шадрина выполнена на высоком научном уровне, с использованием передовых методов диагностики турбулентных потоков. **Достоверность** результатов измерений и **обоснованность** выводов не вызывают сомнений. Полученные результаты обладают **научной новизной** и **важны** для развития исследований в области механики жидкости и газа, имеют хорошие перспективы **практического применения**.

Замечания

1. Измерения проводились на изотермических моделях энергетического оборудования. В главе 2 (стр. 35) говорится, что полученные результаты можно переносить на случай с горением топлива. При этом не отмечено, какие расхождения можно ожидать при переносе. Если сходство изотермического и реагирующего потока только качественное, то стоило ли тратить силы на повышение точности измерений и оценку погрешностей? При обосновании выбора изотермической модели автор ссылается на единственную работу по численному моделированию (номер 64 в списке источников). Можно ли в данном случае полагаться только на расчёты?
2. Следовало бы больше времени уделить подготовке рисунков. Ряд из них содержит досадные оплошности. Например: единицы измерения на Рис. 1.1 указаны с ошибкой; приходится гадать, какому значению u на Рис. 1.10а соответствует распределение Рис. 1.10в; на Рис. 2.2 показана левая система координат, а в работе везде используется правая; на Рис. 1.10 и 3.8 одна и та же, видимо, компонента скорости обозначается разными буквами.
3. Последнее предложение на стр. 31 не закончено.
4. В главе 1 (стр. 31) указан диапазон автомодельности $Re > 10^4$, а в главе 2 (стр. 35) $Re > 10^5$. Если это не опечатка, то нужны пояснения.

5. Если исследуемые течения автомоделены, а результаты предполагается масштабировать, то почему все основные результаты приведены в размерных величинах?
6. Жалко, что в приложении А показана только лицевая сторона патента РФ № 2585347. Имя автора на оборотной стороне патента украсило бы работу.
7. На стр. 39 автор пишет, что изображение интерференционного поля в рассеянном назад свете формируется на поверхности фотоприёмника (речь идёт о лазерном доплеровском анемометре). Забавное утверждение.
8. На стр. 42 говорится, что датчик давления, в данных экспериментах (в комбинации с отборником), имел линейный отклик в полосе частот до 100 Гц. На спектрах Рис. 3.9 и 3.16 граничная частота составляет 200 Гц. Собственно датчик имеет рабочую полосу вплоть до 20 кГц. С какой частотой записывался сигнал с датчика давления? Использовался ли фильтр нижних частот? В тексте работы об этом не сказано. Может быть, упомянутые спектры страдают подменой частот?
9. На стр. 79: что такое «ВУТ»? Там же, на Рис. 3.30: что такое «частица ВУС»? Это мелкая угольная пылинка, обтянутая водяной плёнкой? Чем «частица ВУС» отличается от «угольной частицы»? Как их различать по приведённому фото?
10. Жаль, что список сокращений и обозначений запрятан в самый конец рукописи. Впрочем, толку от него немного, принятые обозначения меняются по ходу работы без объявления. Кроме того, в списке определены x -, y - и z -компоненты скорости, а сами оси даже не упомянуты.

Приведённые замечания относятся, по большей части, к оформлению рукописи, они не критичны и не снижают общую высокую оценку диссертации.

Основные результаты диссертационной работы доложены на научных международных и российских конференциях, опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК России. Полученные Е.Ю. Шадриним результаты можно квалифицировать как новое достижение в области механики жидкости и газа. Я надеюсь, что полученные результаты будут развиваться дальше и найдут практическое применение в энергетике. Диссертационная работа Е.Ю. Шадрина по своим целям, задачам, содержанию, методикам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы. Содержание

диссертации адекватно и достаточно полно отражено в автореферате. Работа написана квалифицированно и грамотно.

Считаю, что диссертация Е.Ю. Шадрина соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018), а её автор Шадрин Евгений Юрьевич достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН).

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1.

E-mail: bo@itam.nsc.ru. Тел. +7 (383) 330 42 68.

Я, Бородулин Владимир Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Шадрин Евгений Юрьевича, и их дальнейшую обработку.

05 октября 2022 г.

Бородулин Владимир Иванович

Подпись Бородулина Владимира Ивановича заверяю:

Учёный секретарь ИТПМ СО РАН

Кратова Юлия Владимировна

