

О Т З Ы В

официального оппонента

на диссертацию Федосеева Сергея Юрьевича «Численное моделирование тональных компонент спектра гидродинамической вибрации бустерного насоса ЖРД», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью прогнозирования и снижения вибраций в ТНА ЖРД уже на этапе проектирования, до изготовления опытных образцов, что позволит снизить материальные и временные затраты на их отработку, повысить надежность ответственных изделий ракетно-космической техники. Нестационарность и междисциплинарность определяют сложность расчета взаимодействия струи жидкости с конструкцией и являются серьезными препятствиями для исследования данных процессов. Применение современных отечественных вычислительных пакетов дало автору диссертации возможность более точного расчета процесса, а создание методики численного моделирования виброакустических процессов - важный инструмент для исследования режимов работы наукоемкого оборудования.

Вибрации корпуса насоса несомненно зависят от пульсаций давления рабочей жидкости. Вместе с тем вибрации конструкции связаны с возможностью возникновения опасных кавитационных эффектов в гидродинамическом потоке. Тем важнее рекомендации для снижения интенсивности вибраций и исключения опасных эффектов, полученные по результатам моделирования вибрационного процесса. В целом, диссертационная работа посвящена исследованию малоизученных потенциально опасных взаимосвязей между параметрами пульсаций давления в потоке жидкости и вибраций в конструкции, созданию соответствующих методик и является актуальной.

Диссертационная работа имеет значительную теоретическую и практическую значимость при проектировании новых образцов ТНА перспективной техники.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

□ Разработана новая методика расчета трехмерного нестационарного потока рабочей жидкости и вызванных этим потоком механических колебаний элементов конструкции бустерного насоса.

□ Впервые показано влияние утечек через радиальный зазор на генерацию пульсаций давления на роторной частоте в бустерном насосе.

□ Сформулированы рекомендации по снижению амплитуды пульсаций давления путем снижения числа пилонов и размещения дополнительного бандажа в бустерном насосе.

- Впервые рассчитаны амплитуды гидродинамической вибрации корпуса бустерного насоса на частотах, в том числе кратных роторной частоте.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, и их достоверность обусловлена применением фундаментальных законов механики жидкости и газа на основе системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, использованием сертифицированных пакетов программ и подтверждается согласованием расчетов с экспериментальными данными.

Практическое значение работы определяется тем, что методика расчета, разработанная автором, а также установленные связи между конструктивными параметрами и параметрами колебаний позволяют уже на этапе проектирования, до изготовления опытных образцов прогнозировать и формулировать рекомендации по снижению вибраций в ТНА ЖРД, что позволит снизить материальные и временные затраты на их отработку, повысить надежность ответственных изделий ракетно-космической техники.

Результаты научного исследования могут быть использованы в АО «НПО Энергомаш им. академика В.П.Глушко», АО «ГРЦ им. академика В.П. Макеева», на предприятиях нефтегазового сектора и энергетического машиностроения.

Во введении формулируются актуальность, цель и задачи научного исследования, приводятся подразделы, отражающие научную новизну, практическую значимость и достоверность достигнутых научных результатов, показано личное участие автора.

В первой главе приводится обзор литературы, рассмотрена классификация источников вибраций и их деление на гидродинамические и механические. Больше внимание, в соответствии с целями работы автор уделяет первой группе источников. Делается вывод, что для ЖРД важно не

только снижение уровня вибраций, но и снижение уровня пульсаций давления. Далее автор пошагово рассматривает влияние на вибрацию различных источников и делает акцент на различиях методов снижения вибраций в зависимости от действующего источника. При этом автор делает неочевидный вывод о затруднительности создания инженерной методики проектного прогнозирования вибраций от механических источников и считает, что с колебаниями от гидродинамических источников дело обстоит совсем иначе. Далее предлагается проводить исследование в три этапа: оценка характеристик гидродинамического источника колебаний-оценка отклика в конструкции-разработка рекомендаций по снижению вибраций.

Во второй главе принимается в качестве основного допущения при построении физической модели процесса использование модели несжимаемой однофазной жидкости. Вначале у меня вызвала сомнения правомочность использования математической модели несжимаемой жидкости для исследования волновых быстропротекающих процессов в рамках связанной междисциплинарной задачи. Но по мере знакомства с работой выяснилось, что задачи гидродинамическая и механическая решались в рамках упрощенного одностороннего FSI-взаимодействия и мои сомнения развеялись. Процесс рассматривается в нестационарной постановке. В качестве инструмента исследования используется программный комплекс Flow Vision. Моделирование проводится на номинальном режиме, на воде, без учета турбины. Строится адаптивная расчетная сетка, указывается, что общее число ячеек 1.4 млн., правда не упоминаются необходимые отладочные расчеты на сгущающихся сетках. Для преобразования расчетных уровнеграмм в спектрограммы используется БПФ, но не упоминается, используются ли при формировании исходного расчетного сигнала условия теоремы Котельникова и другие ограничения, влияющие на корректность спектрального анализа.

Далее автор исследует влияние на колебательные процессы радиального зазора и пилонов. На стр. 44 автор пишет, что пульсации давления с роторной частотой возникают при наличии радиального зазора и из-за круговой несимметрии течения, что объясняется неравенством $n_{\text{пилонов}}$ и $n_{\text{лопаток}}$. Логично было бы провести расчет при наличии радиального зазора и $n_{\text{пилонов}} = n_{\text{лопаток}}$, чтобы убедиться в этом.

Проводится анализ экспериментальных данных, который затруднен из-за принятой формы представления результатов натурных испытаний.

В третьей главе рассматриваются вопросы, связанные с расчетной оценкой отклика конструкции на пульсации давления в проточном тракте. Приводятся известные математические соотношения, принятые в программном комплексе ABAQUS. Известно, что для этого пакета и пакета Flow Vision имеется модуль сопряжения, позволяющий передавать гидродинамические нагрузки в расчет механической системы. Вначале определяются собственные колебания корпуса насоса, а затем — вынужденные. Автор проводит предварительную обработку пульсаций давления перед их использованием в расчете вынужденных колебаний, что не является очевидной необходимостью в связи с наличием специального модуля сопряжения механической и гидродинамической частей во Flow Vision. Проведен отдельный анализ вибраций в корпусе и пилонах. В дальнейшем, при анализе колебаний корпуса бустерного насоса предполагалось, что коническая его часть воспринимает вибрации от турбины, а цилиндрическая — преимущественно от шнека. При этом проведен уточненный расчет пилонов с корпусом, но не целиком, а лишь с цилиндрической его частью, что может быть оправдано методически, но может и потребовать дополнительной проверки. Колебания корпуса как с пилонами, так и без пилонов происходили как на роторной, так и лопаточной частотах. Изменились форма и амплитуды колебаний. Последние усилились. В выводах к главе автор отмечает некоторые «узкие» места своего исследования и предлагает искать пути снижения вибраций.

В четвертой главе автор предлагает опираясь на проведенные теоретические исследования разработать рекомендации по снижению пульсаций давления и вибраций в насосе, а уточнение рекомендаций и дополнительную верификацию провести в дальнейшем силами предприятия-разработчика насосов. Такой подход представляется, в силу чрезвычайной сложности и перспективности расчетной задачи, более оправданным и честным, чем формулировка рекомендаций на базе упрощенных моделей, не учитывающих влияние потока и конструкции даже при наличии достаточной экспериментальной проверки. Поиск форм колебаний введением дополнительных датчиков, предлагаемый автором представляется малоинформативным и рискованным, тем более, что в настоящее время существуют такие мощные средства контроля как лазерные виброметры и т.п.

Одним из этапов развития полученных во второй и третьей главах результатов является исследование пульсаций давления на отличных от номинала режимах. Анализируя полученные в ходе проведения вычислительных экспериментов результаты автор делает вывод, что снижение пульсаций на всех рассмотренных режимах можно достичь при уменьшении обратных токов. Для этого предложено использовать бандаж. Эта идея проверена расчетом, который показал возможность существенного снижения пульсаций давления при минимизации радиального зазора, но вместе с тем обнаружил значительные потери полного давления. Которые, впрочем наблюдались и без бандажа. При

этом, возможно, моделирование методом «скользящих поверхностей» снижает точность расчетов, т.к. связано с необходимостью использования 2-х интерфейсов.

Проведен расчет для выявления влияния пилонов на процесс обтекания на шнека. Выявлено, что обтекание шнека в конструкции без пилонов выявляет существенное снижение колебаний давления, а значит увеличение проходного сечения на входе в насос благоприятно воздействует на снижение колебаний.

В заключении автор повторяет полученные результаты.

Замечания по работе

1. В главе 3 говорится о предварительной отработке пульсаций давления перед экспортом в качестве нагрузки на механическую систему. В чем эта обработка заключается?
2. Нет анализа решений на стгущающихся сетках.
3. Для данного класса задач необходимо проводить расчеты с учетом присоединенной массы, об этом автор пишет на стр. 67, но непонятно как это реализовано в работе.
4. Для наглядности лучше бы было совместить на одном поле расчетные результаты автора и результаты, полученные в ходе натурных экспериментов.
5. В тексте диссертации есть неточности оформительского характера и опечатки, например:
 - на стр. 65 производится сравнение результатов расчетов, представленных на рис.34 и рис.24, но рис.24 соответствует частоте 90Гц, а рис.34–264 Гц.
 - на стр.66 делается ссылка на рис.24 и отмечается, что там результаты соответствуют 264Гц, но рис.24 на стр.55 соответствует частоте 90Гц.
 - стр. 63 (п.3.5 1-й абзац) в слове влияния
 - стр. 29 (2 абзац) в слове схлопыванием
 - стр. 74 нет разделителя целой и дробной частей 0,2
 - стр. 75 в 1- м предложении пропущено слово «сетки»
 - некоторые рисунки приводятся в тексте раньше, чем ссылка на них:
 - рис. 11 (стр. 38), рис. 12 (стр 39) – ссылки на стр. 40
 - рис.20 (стр. 51) – ссылка на стр. 52
 - рис.25 (стр. 56) – ссылка на стр. 57
 - рис.22 (стр. 54) – ссылка на стр. 54
 - рис. 35 (стр. 66) – ссылка на стр. 66
 - рис.23 (стр. 55) – ссылка на стр. 58
 - рис. 26 – нет ссылки
 - рис. 36 (стр. 66), ссылка есть, а рисунка нет
 - имеются повторы: на стр. 24 фраза «Обычно решить проблему...» начиная с 3 строки сверху и начиная со 2 строки снизу.

Сделанные замечания не являются принципиальными и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Федосеева Сергея Юрьевича на тему «Численное моделирование тональных компонент спектра гидродинамической вибрации бустерного насоса ЖРД», является законченной научно- квалификационной работой, в которой изложена новая методика расчета трехмерного нестационарного потока рабочей жидкости и механических колебаний элементов конструкции бустерного насоса, а по результатам вычислительных экспериментов обеспечено снижение амплитуд пульсаций давления при уменьшении числа пилонов и за счет размещения дополнительного бандажа. Эти результаты могут быть использованы при решении прикладных задач, стоящих перед предприятиями ракетно-космической отрасли. Характер результатов работы соответствует критериям, предъявляемым кандидатским диссертациям Положения о присуждении ученых степеней.

Полученные автором результаты достоверные, выводы и заключения обоснованы. Основные положения и результаты диссертации в должной мере отражены в научных публикациях, в том числе в изданиях рекомендованных ВАК, и имеют достаточный уровень апробации на научных конференциях.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Считаю, что Федосеев Сергей Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Модорский Владимир Яковлевич
д.т.н., зам. декана аэрокосмического
факультета Пермского национального
исследовательского политехнического
университета,
профессор кафедры МКМК

Модорский В.Я.

(614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29
Тел.: 8 (342) 239-12-24
E-mail: modorsky@pstu.ru)

Подпись Модорского Владимира Яковлевича
д.т.н., зам. декана аэрокосмического
факультета Пермского национального
исследовательского политехнического
университета, профессора
кафедры МКМК заверяю:

Ученый секретарь ПНИИП
к.ист.н., доцент



Макаревич В.И.