



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО**  
**«НПО ЭНЕРГОМАШ имени академика В.П. Глушко»**

**«УТВЕРЖДАЮ»**



Заместитель генерального директора  
Главный конструктор  
д.т.н., профессор

В. К. Чванов

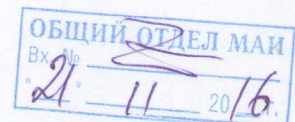
11 2016 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Клименко  
Дмитрия Викторовича «Методика расчёта пульсаций давления в  
шнекоцентробежном насосе ЖРД трехмерным акустико-вихревым методом»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и  
энергоустановки летательных аппаратов»

#### Актуальность темы диссертационной работы

Необходимость повышения надежности и ресурса современных жидкостных ракетных двигателей, создание ЖРД многократного применения с широким диапазоном регулирования по тяге выдвигает на первый план задачу численного моделирования рабочих процессов в узлах и агрегатах двигательной установки. Опыт показывает, что надежность турбонасосных агрегатов подачи (ТНА), в особенности высокооборотных шнекоцентробежных насосов, является ключевым элементом в обеспечении надежности и ресурса двигателя. Рабочий процесс повышения давления компонентов топлива в шнекоцентробежных насосах сопровождается высоким уровнем пульсаций давления и вибрации. Снижение вибрационных нагрузок на элементы конструкции турбонасосных агрегатов позволяет обеспечить высокие требования к их надежности, что в свою очередь положительно сказывается на надежности всей двигательной установки. Развиваемое в работе направление исследований, дает возможность





рассчитать пульсации давления на частотах следования рабочих лопаток (ЧСЛ) в элементах проточной части. Это обеспечивает новые возможности совершенствования конструкции новых насосов на этапе эскизного проектирования и для оптимизации существующих шнекоцентробежных насосов, существенно сокращая затраты на экспериментальные работы и доводку новых агрегатов и двигателей. Таким образом, тематика диссертационной работы является весьма актуальной для ракетно-космической двигательной отрасли и других отраслей промышленности, где разрабатываются и применяются шнекоцентробежные насосные агрегаты.

### **Научная новизна и практическая значимость работы**

Автором предложена новая методика определения амплитуд дискретных компонент спектра пульсаций давления с использованием трехмерного вычислительного эксперимента, которая обеспечивает расширение возможностей численного моделирования генерации и распространения пульсаций давления на реальную геометрию проточной части шнекоцентробежных насосов ЖРД. Расчетным путем подтверждено, что амплитуды пульсаций давления в рабочей полости, в частности, в каналах направляющего аппарата, в 5 – 10 раз выше, чем на выходе из насоса. Автором определена связь амплитуды пульсаций давления дискретных компонент ЧСЛ с напором шнекоцентробежного насоса ТНА ЖРД, показано, что вариант конструкции, соответствующий наилучшим энергетическим параметрам, не дает минимального уровня амплитуды пульсаций ЧСЛ.

**Достоверность результатов** и обоснованность научных положений предлагаемой методики обеспечена:

- использованием методологии декомпозиции основных уравнений сжимаемой среды с получением акустико-вихревого уравнения и введением комплексного акустического импеданса;



- результатами модельных испытаний насосов и натурных огневых испытаний в составе двигательной установки на стендах с сертифицированными средствами измерений;

- применением сертифицированного пакета программного обеспечения для численного моделирования нестационарного трехмерного потока в шнекоцентробежном насосе;

- согласованием результатов численного моделирования с результатами экспериментальных исследований.

### **Общие сведения о диссертационной работе**

Диссертационная работа Клименко Д.В. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 98 страниц, библиография включает 82 ссылки.

Во **введении** обосновывается актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

В **первой главе** показано, что вибрация гидродинамической природы обусловлена особенностями течения рабочей жидкости в проточной части шнекоцентробежного насоса. Исследования центробежных насосов показывают, что, как правило, максимальные амплитуды в спектрах пульсаций давления и вибрации на расчетных режимах имеют дискретные составляющие на частотах следования лопаток рабочего колеса (ЧСЛ) и их гармониках. Рассмотрены основные одномерные модели расчета пульсаций давления и вибрации, а также модели, основанные на методах вычислительной гидродинамики. Проведенный анализ показывает актуальность проблемы дальнейшего распространения акустико-вихревого метода для расчета пульсаций давления в шнекоцентробежных насосах ЖРД в трехмерной постановке.

Во **второй главе** описывается акустико-вихревая модель и получение конечно-разностных аналогов для трехмерного акустико-вихревого уравнения в декартовой системе координат, а также приведена методика расчёта амплитуд пульсаций давления ЧСЛ в отводе шнекоцентробежного



насоса. Физико-математическая модель генерации акустико-вихревых колебаний основана на представлении нестационарного движения сплошной среды как совокупности акустической и вихревой мод движения с применением декомпозиции граничных условий и введением комплексного акустического импеданса. Экспериментальная версия программного обеспечения разработана на основе программного пакета FlowVision, сертифицированного для расчета насосов.

В третьей главе приведены результаты трёхмерных расчётов амплитуд пульсаций давления в отводах шнекоцентробежных насосов и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. В целом амплитуды, полученные расчётным путём, качественно согласуются с экспериментальными данными. Отклонение не превышает 5 дБ. Показано, что амплитуда пульсаций давления ЧСЛ на входе в каналы направляющего аппарата (НА) в 5 – 10 раз выше, чем на выходе из насоса. Вычислительными экспериментами доказано, что применение трубчатого направляющего аппарата снижает амплитуду первой гармоники ЧСЛ в каналах НА в два раза. При этом амплитуда пульсаций давления на выходе из насоса при применении трубчатого направляющего аппарата снижается в 1.6 раза, что согласуется с данными огневых испытаний.

В четвертой главе приводятся примеры вычислительных экспериментов по изучению пульсаций давления в шнекоцентробежном насосе. Изучается влияние расходного параметра на амплитуду пульсаций давления ЧСЛ на выходе шнекоцентробежного насоса, исследуется влияние угла установки каналов трубчатого направляющего аппарата на потери энергии и амплитуду пульсаций давления.

В заключительной части диссертации приведены выводы и рекомендации.

По теме диссертации опубликовано четыре статьи в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК, основные положения и



результаты диссертации представлены на пяти международных научно-технических конференциях.

#### **Рекомендации по использованию диссертации**

Предлагаемая в диссертационной работе методика позволяет рассчитывать амплитуды пульсаций давления на частотах следования лопаток в проточной части насоса, дает возможность оценить гидродинамические нагрузки, действующие на элементы проточной части, на ранних стадиях проектирования, а также при совершенствовании существующих конструкций насосов. Результаты диссертационной работы могут быть использованы на предприятиях-разработчиках ракетно-космической техники АО «НПО Энергомаш», «Салют», НИЦ РКП, и других при выборе мест установки датчиков пульсаций давления и вибрации на турбонасосных агрегатах на экспериментальных стендах, а также для прогноза уровня пульсаций давления в шнекоцентробежных насосах вновь создаваемых ЖРД. Работа имеет большую практическую значимость при создании рабочей версии программного обеспечения FlowVision НРС ООО «ТЕСИС» для расчета пульсаций давления с использованием кластерных технологий.

#### **Замечания по содержанию диссертации**

Положительно оценивая работу в целом, считаем необходимым высказать следующее замечание: автор рассматривает только однофазное течение среды, но в случае развития кавитации, в рабочей жидкости присутствует газовая фаза, которая влияет на интенсивность гидродинамической вибрации насоса.

Отмеченное замечание не снижает общей положительной оценки диссертационной работы и не влияет на ее основные результаты.

#### **Заключение о соответствии диссертационной работы критериям установленным в положении о присуждении ученых степеней**

Диссертация Клименко Д.В. является законченной научно-квалификационной работой, включающей в себя совокупность новых



научных результатов и положений, их обоснование и применение к практическим задачам проектирования высокооборотных шнекоцентробежных насосов ЖРД. Цель работы достигнута. Диссертация написана технически грамотным языком, содержит логически стройный материал.

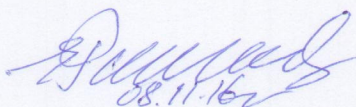
Диссертация соответствует требованиям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842.

Клименко Д.В. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 —«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Диссертационная работа Клименко Д.В. рассмотрена на заседании отдела агрегатов ЖРД (722) (протокол №948 от 08.11.2016).

Начальник отдела

агрегатов ЖРД, к.т.н.



Е. Н. Ромасенко

141401, Россия, Московская обл, г. Химки, ул. Бурденко, 1, АО «НПО Энергомаш»

Телефон: +7 (495) 286-90-80

Факс: +7 (495) 286-91-36; +7 (495) 286-91-37

E-mail: [energo@npoem.ru](mailto:energo@npoem.ru)