

**Отзыв официального оппонента на диссертационную работу
Клименко Дмитрия Викторовича**

**«МЕТОДИКА РАСЧЕТА 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».

Целью диссертационной работы является разработка методики расчета дискретных компонент спектра пульсаций давления в шнекоцентробежном насосе ЖРД с применением трехмерного акустико-вихревого метода.

Во ВВЕДЕНИИ сформулирована актуальность темы работы. Отмечено, что максимальные амплитуды в спектрах пульсаций давления и вибрации наблюдаются на частотах следования лопаток рабочего колеса (ЧСЛ) и их гармониках. Эти колебания вызваны нестационарным гидродинамическим взаимодействием неоднородного потока на выходе рабочего колеса с направляющим аппаратом.

Актуальность работы вытекает из необходимости повышения надежности и ресурса жидкостных ракетных двигателей при разработке ЖРД многократного применения. Для решения задачи определения амплитуд пульсаций давления на ранних этапах проектирования предлагается методика расчета дискретных компонент спектра пульсаций давления в шнекоцентробежном насосе ЖРД с использованием акустико-вихревого метода.

Практическая значимость и **научная новизна** рецензируемой работы определена возможностью получения амплитуд пульсаций давления в разных точках проточной части в трехмерной постановке, что обеспечивает возможность прогнозирования динамических нагрузок, действующих на элементы проточной части насосов в процессе проектирования и выработке оптимальных конструктивных решений на ранней стадии проектирования.

Апробация диссертационной работы выполнена в докладах на пяти международных конференциях.

В первой главе «**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПРОБЛЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В НАСОСАХ**» проведен анализ публикаций по проблеме пульсаций давления и вибрации. Показано, что пульсации давления ЧСЛ являются основными и определяют вибрационную активность насоса. Этот анализ подтверждает актуальность развития и применения акустико-вихревого метода для расчёта пульсаций давления в центробежных насосах.

Во второй главе «**ПОСТРОЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ**» развивается акустико-вихревая модель для трехмерной

проточной части насоса и получены конечно-разностные аналоги акустико-вихревого дифференциального уравнения в декартовой системе координат с учетом акустического импеданса на входной и выходной границах, а также формула для расчета источниковой функции.

Обоснованность научных положений предлагаемого метода расчета базируется на применении основных уравнений движения сжимаемой среды и проведении строгой декомпозиции поля скоростей на вихревую и акустическую моды. Для декомпозиции на входной и выходной границе расчетной области используется удельный комплексный акустический импеданс. Движение сжимаемой жидкости представляется в виде векторной суммы основного поступательного и вращательного движения жидкости как несжимаемой среды (вихревая мода) и малых колебаний, обусловленных сжимаемостью (акустическая мода).

При выводе акустико-вихревых уравнений приняты следующие допущения: поток дозвуковой, течение изоэнтропийное, при распространении акустических колебаний вязкая диффузия не учитывается, акустические колебания существенно меньше вихревых.

Расчеты проводятся в безразмерных величинах. При решении волнового уравнения относительно пульсаций давления в качестве пространственного масштаба используется наружный диаметр колеса, а в качестве характерной скорости - окружная скорость на наружном диаметре центробежного колеса. Полученные в расчете пульсации давления представляют собой сумму колебаний вихревой моды (псевдозвука) и акустических колебаний.

Алгоритм решения трехмерного акустико-вихревого уравнения применительно к высокооборотному шнекоцентробежному насосу ЖРД реализован в «акустической модели» бета-версии пакета прикладного программного обеспечения FlowVision. Решение разделено на два шага. На первом шаге выполняется численное моделирование нестационарного турбулентного течения несжимаемой жидкости.

Нестационарное поле скоростей и давлений, полученное на первом шаге, используется для расчета источниковой функции волнового уравнения и постановки граничного условия на входе в отвод.

На втором шаге выполняется решение волнового акустико-вихревого уравнения для определения пульсаций давления на частоте следования лопаток или ее гармониках.

Оба этапа решения проводятся в среде программного комплекса FlowVision. **Достоверность выводов и рекомендаций** диссертационной работы обеспечивается использованием экспериментальных данных, полученных на сертифицированных модельных и огневых стендах, а также использованием программного пакета FlowVision, сертифицированного для расчетов насосов.

В третьей главе «ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ПСЕВДОЗВУКОВЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И ИХ СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ ИСПЫТАНИЙ ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА» приведены результаты трёхмерных расчетов амплитуд пульсаций давления с учетом декомпозиции пульсаций

давления на акустическую и вихревую моды.

Расчетная область в математическом пространстве состоит из ряда подобластей: подвода, ротора, отвода, которые виртуально объединяются через скользящие поверхности и граничные условия, расположенные на входе и выходе шнекоцентробежного колеса, на ответных поверхностях подобластей подвода и отвода.

Численное моделирование проводилось нестационарным итерационным методом от нулевых значений. В качестве начальных условий в расчетной области задаются нулевые значения скорости и давления. Для выхода на стационарный режим требовалось семь полных оборотов центробежного колеса. После сходимости по напору проводился акустический расчет амплитуд пульсаций давления.

Амплитуды пульсаций давления фиксировались в двух точках направляющего аппарата, в трех точках по длине спирального сборника и на выходе из насоса.

Измерение пульсаций давления в условиях модельных испытаний полностью соответствует расчетной постановке. Расчетные амплитуды качественно совпадают с опытными данными. Получено согласование с экспериментальными данными с отклонением не выше 5 дБ, что является удовлетворительным результатом для акустических расчетов и подтверждает новизну диссертационной работы в части зависимости амплитуды ЧСЛ от величины коэффициента напора насоса и характеру изменения амплитуды пульсаций давления по длине проточной части отвода. Расчетами установлено, что амплитуда пульсаций давления на частоте следования лопаток снижается по длине проточной части в десять раз.

Был проведен расчет двух вариантов направляющего аппарата: классического лопаточного и канального с круглым сечением каналов. Эти расчеты проводились с натурным рабочим телом - жидким кислородом. Трубчатый направляющий аппарат имел меньшие потери давления и меньшую амплитуду давления на первой гармонике частоты следования лопаток. Амплитуда пульсаций давления на первой гармонике частоты следования лопаток на выходе насоса снизилась в 1,6 раза. В канале направляющего аппарата амплитуда пульсаций давления снизилась в два раза.

В четвертой главе «ПОЛУЧЕНИЕ АМПЛИТУД АКУСТИЧЕСКИХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА ВЫХОДЕ ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ДЛЯ НАТУРНЫХ УСЛОВИЙ ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ» приводится пример апробации методики расчета пульсаций давления в шнекоцентробежном насосе и изучается влияние угла установки каналов направляющего аппарата на амплитуды пульсаций давления.

Рабочая область такая же, как и в третьей главе, однако термин отвод заменен термином статор. Входное устройство дополнено входным трубопроводом. Для уменьшения времени расчета не учитываются утечки через радиальный зазор шнека, механические потери. Амплитуда пульсаций давления первой гармоники частоты следования лопаток зависит от изменения

расхода, причем при минимальном значении расхода она на порядок больше амплитуд в области расчетного расхода.

Проедена серия вычислительных экспериментов по определению угла установки лопаток направляющего аппарата. Изменения КПД при изменении угла от 18 до 22 градусов находятся в пределах точности измерений.

Формулировка основных результатов и выводов логически следует из содержания диссертационной работы. Основное содержание и результаты диссертационной работы представлены в шести публикациях, четыре из которых - в изданиях, рекомендованных ВАК.

В рецензируемой диссертационной работе объектом исследования является шнекоцентробежный насос ЖРД с лопаточным направляющим аппаратом и двумя симметрично расположенными спиральными отводами. На практике в ЖРД часто используются насосы с без лопаточных аппаратов с одним спиральным отводом. Не ясно какие рекомендации диссертанта будут справедливы для таких насосов.

В диссертации иногда приводятся значения параметров с пятью значащими цифрами (например, на стр. 76). Точность экспериментов позволяет гарантировать только три значащие цифры.

Встречаются, иногда, описки. Например, два рисунка с номером 3.1 на стр. 48 и стр. 49. Но в целом диссертационная работа оформлена отлично.

Заключение

Диссертация Клименко Д. В. представляет собой законченную работу, выполненную на высоком уровне, отвечающую требованиям ВАК, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов». Автореферат диссертации дает полное представление о работе.

Доктор технических наук, профессор.

Профессор кафедры «Гидравлика»

Московского политехнического университета (МПУ)

Анатолий Александрович Шейпак

Подпись Шейпака А. А. удостоверяю

адрес 107023, г. Москва,

ул. Б.Семёновская, д. 38.

e-mail: mospolytech@mospolytech.ru

Рабочий телефон 8(495) 276-32-70



Начальник
управления по
работе с персоналом
О.К. Маслянина