

**ДИНАМИКА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Приведен обзор основных результатов исследований в области динамики жидкостных ракетных двигательных установок, продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей, гидрогазодинамики лопаточных машин и динамики гидравлических систем с кавитирующими местными гидравлическими сопротивлениями, полученных коллективом сотрудников отдела динамики гидромеханических систем Института технической механики НАН Украины и НКА Украины в период с 1998 г. по 2008 г.

The basic results of studies in the dynamics of liquid rockets propulsion systems, the longitudinal stability of liquid launch vehicles, the hydrogasdynamics of vane engines and the dynamics of hydraulic with cavitating local hydraulic resistances are reviewed. These results are obtained by the team of researchers of the Department of Hydraulic and Mechanic Systems of the Institute of Technical Mechanics, NASU&NSAU from 1998 to 2008.

**Динамика жидкостных ракетных двигательных установок**

**Развитие теории низкочастотных кавитационных автоколебаний в системах питания жидкостных ракетных двигателей.** Одной из основных тенденций проектирования и создания турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) является рост числа оборотов и напора насосных агрегатов, увеличение окружных скоростей на периферии осевых шнековых преднасосов, что способствует развитию кавитации во входной части шнекоцентробежных насосов. При определенных условиях кавитация в насосных агрегатах ЖРД может вызвать самовозбуждающиеся низкочастотные (от 4 до 50 Гц) автоколебания давлений и расходов компонентов топлива. Кавитационные автоколебания затрудняют, а иногда делают невозможным нормальное функционирование насосной системы питания ЖРД во время его работы в полёте жидкостной ракеты. Проблема кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРД стала актуальной как в бывшем СССР (где она приобрела общепромышленный масштаб), так и за рубежом (США, Япония, Франция и др.). Сотрудники отдела динамики гидромеханических систем Института технической механики НАН Украины и НКА Украины внесли определяющий вклад в решение проблемы кавитационных автоколебаний. Были выполнены систематические теоретические и обширные экспериментальные исследования низкочастотных кавитационных автоколебаний в насосных системах питания жидкостных ракетных двигательных установок (ЖРДУ), что позволило сформировать новые представления о динамических процессах в таких установках. Была создана теория кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРДУ, которая дает возможность прогнозировать устойчивость насосной системы питания по отношению к кавитационным колебаниям (а в случае потери устойчивости насосной системы – прогнозировать амплитуды, частоты и формы колебаний) и проводить количественный анализ влияния конструктивных и режимных параметров системы на кавитационные автоколебания. Достоверность теории подтверждена удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных [1, 2]. Созданная теория позволяет на качественно новом уровне подойти к решению задач линейной и нелинейной динамики ЖРД (расчёт частотных характеристик и процесса запуска двигателя) и ракеты в целом (анализ продольной устойчивости, оценка амплитуд продольных колебаний корпуса ракеты) и получать достоверные количественные результаты. На её основе были разработаны новые эффективные способы и средства уст-

ранения кавитационных автоколебаний [1 – 3]. Ниже представлены следующие основные результаты развития этой теории в период с 1998 г. по 2008 г.

Проведены теоретические исследования кавитационных течений (прежде всего, нестационарных) в осевых шнековых преднасосах насосов ЖРД [4, 5]. Впервые выполнен анализ устойчивости плоского нестационарного кавитационного обтекания решетки пластин в рамках модели идеальной жидкости на основе системы нелинейных уравнений в частных производных, аппроксимирующих точные соотношения для такого течения [6]. Полученные результаты позволяют лучше понять закономерности явления нестационарной кавитации в лопаточных насосах.

Разработан метод расчёта параметров несимметричных кавитационных течений в осевых шнековых преднасосах ЖРД. С использованием этого метода впервые с теоретических позиций объяснены имеющиеся экспериментальные факты [7].

Разработана математическая модель внутринасосных кавитационных автоколебаний в осевых шнековых преднасосах ЖРД, и на её основе объяснены экспериментальные факты существования внутринасосной неустойчивости.

Систематизированы и обобщены результаты экспериментальных исследований шнекоцентробежных насосов ЖРД различной размерности и производительности. С использованием экспериментальных значений частот кавитационных колебаний в насосной системе для указанных насосов уточнены полученные ранее обобщенные зависимости основных параметров, характеризующих кавитационное течение в шнекоцентробежных насосах, от давления на входе в насос и расхода через насос [8]. Дано объяснение аномальному виду экспериментальных кавитационных характеристик для некоторых лопастных насосов. Разработан новый способ определения кавитационных функций шнека и шнекоцентробежного насоса. На основе полученных результатов проведено уточнение экспериментально-расчетной линейной модели динамики кавитирующих шнекоцентробежных насосов ЖРД, использование которой при решении различных задач динамики ЖРДУ и продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей (РН) позволяет заметно повысить достоверность расчётных данных.

С целью лучшего согласования расчетных и экспериментальных значений амплитуд давления на входе в шнекоцентробежный насос ЖРДУ построена экспериментально-расчётная нелинейная модель динамики кавитирующих шнекоцентробежных насосов, коэффициенты которой определены на основе результатов экспериментальных исследований динамики шнекоцентробежных насосов ЖРД различной размерности и производительности.

*Математическое моделирование процесса запуска ЖРДУ.* Ранее в отделе была решена задача математического моделирования запуска ЖРД с учетом кавитационных явлений в шнекоцентробежных насосах в соответствии с теорией кавитационных автоколебаний в системе питания ЖРД. На основании результатов математического моделирования установлено, что учёт кавитационных явлений в насосах в математических моделях ЖРД повышает достоверность прогнозирования процесса запуска двигателя.

В работе [9] показано, что использование экспериментально-расчётной нелинейной модели динамики кавитирующих шнекоцентробежных насосов при математическом моделировании процесса запуска жидкостного ракетно-

го двигателя РД-8 позволило получить удовлетворительное согласование расчётных и экспериментальных результатов.

**Математическое моделирование переходных процессов в ЖРДУ при аварийных ситуациях.** Математическое моделирование переходных процессов в ЖРДУ при аварийных ситуациях является важным направлением выяснения причин аварийных исходов огневых стендовых испытаний ЖРДУ и лётных испытаний РН с ЖРДУ. Анализ результатов математического моделирования позволяет сузить круг поиска возможных причин аварий, отбросить несостоятельные версии и остановиться на наиболее вероятной из них, а в отдельных случаях (при достаточном количестве измерений) однозначно установить причину аварийного исхода.

Разработка адекватных математических моделей динамики ЖРДУ базируется на результатах многолетних исследований динамики как отдельных элементов, так и ЖРДУ в целом, проведенных в НПО “Энергомаш” (Россия), ГП “КБ “Южное” и ИТМ НАНУ и НКАУ. При этом важную роль играет использование в математических моделях динамики ЖРДУ нелинейных динамических моделей кавитирующих насосных агрегатов достаточной полноты описания и достоверности. Такие модели кавитирующих насосных агрегатов разработаны в отделе в соответствии с теорией кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРД. На основе математических моделей динамики ЖРДУ можно рассчитывать параметры установившегося режима и переходные процессы в ЖРДУ при аварийных ситуациях.

В 2005 году было выполнено математическое моделирование динамических процессов в маршевой ЖРДУ третьей ступени РН “Циклон-3” в условиях нештатной работы маршевого двигателя третьей ступени при пуске РН № 40Л. Получено удовлетворительное согласование результатов математического моделирования и соответствующих данных телеметрических измерений параметров ЖРДУ в полете третьей ступени РН № 40Л. Сформировано заключение о причинах, объясняющих аномальное поведение параметров движения третьей ступени и выдачу команды аварийного выключения маршевого двигателя третьей ступени. Полученные результаты были переданы в ГП “КБ “Южное” для разработки мероприятий по повышению надежности маршевой ЖРДУ третьей ступени РН “Циклон-3”.

В 2007 году было выполнено математическое моделирование гидродинамических процессов в маршевом двигателе первой ступени РД171М при аварийном пуске РКН “Зенит-3SL” № SL24. На основании результатов математического моделирования, которые удовлетворительно согласовывались с данными телеметрических измерений, была сформирована наиболее вероятная версия о причинах аварийного пуска РКН “Зенит-3SL” № SL24. Полученные результаты были переданы в ГП “КБ “Южное”.

### **Продольная устойчивость жидкостных ракет-носителей**

Одной из крупных научно-технических проблем ракетно-космической техники является проблема обеспечения продольной устойчивости жидкостных ракет. Если она не решена своевременно (на этапе эскизного проектирования), то при первых же лётно-конструкторских испытаниях ракет могут возникнуть колебания конструкции корпуса в направлении продольной оси ракеты на активном участке траектории её полета. Продольные колебания могут достичь опасных уровней и способны нарушить нормальную работу

приборов системы управления и привести к различным аварийным ситуациям. Несмотря на накопленный в Украине, России, США, Франции и других странах опыт устранения продольных колебаний жидкостных ракет, проблема обеспечения продольной устойчивости продолжает оставаться актуальной и требует своего анализа и решения при разработке новых и модернизации существующих ракет в каждом конкретном случае. Необходимость её теоретического решения обусловлена тем обстоятельством, что факт устойчивости (или потери устойчивости) жидкостных РН может быть установлен только при их лётно-конструкторских испытаниях, когда устранение недопустимых продольных колебаний или снижение амплитуд продольных колебаний до безопасного уровня требует значительных материальных и финансовых затрат. Для исключения подобных затрат необходимо проведение максимально возможного объема теоретических исследований продольной устойчивости конкретной РН на всех этапах её разработки или модернизации.

Сотрудники отдела внесли существенный вклад в решение проблемы обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН. Была разработана линейная теория продольной устойчивости жидкостных РН, прежде всего, за счёт учета кавитационных явлений в насосах ЖРД, разработаны не имеющие аналогов в Украине и за рубежом методики анализа и средства обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН [3]. Разработанное в отделе научно-методическое и программное обеспечение позволило выполнить анализ продольной устойчивости РН различного назначения, созданных в ГКБ “Южное” (в том числе РН “Зенит” на всех этапах её разработки), других организациях бывшего СССР и принять практические меры по обеспечению продольной устойчивости этих РН.

Дальнейшее развитие линейной теории и методик анализа продольной устойчивости жидкостных РН осуществлялось в отделе с целью повышения точности прогнозирования продольной устойчивости РН. Предложен новый подход к математическому моделированию собственных продольных колебаний конструкции корпуса РН как диссипативной системы с конечным числом степеней свободы с учётом динамического взаимодействия элементов конструкции корпуса и ЖРДУ первой ступени РН, включающей кавитирующие шнекоцентробежные насосы [10]. Использование такого подхода позволило расширить представления о потере продольной устойчивости жидкостных РН.

Предложен подход к параметрической идентификации динамической системы “ЖРДУ – корпус РН” в классе линейных моделей с использованием экспериментальных частот продольных колебаний жидкостных РН и теоретических оценок параметрической чувствительности системы.

Разработана методика проведения декомпозиции динамической системы “питающие магистрали–маршевый ЖРД с окислительной схемой дожигания генераторного газа”, позволяющая исследовать влияние отдельных подсистем на параметры колебательного процесса в ЖРДУ и провести диагностику потери устойчивости системы по отношению к различным видам колебаний [11]. При этом исследуемая динамическая система рассматривалась как многоконтурная, а параметры собственных колебаний этой системы и ее подсистем определялись на основе методики анализа устойчивости многоконтурной динамической системы “ЖРДУ – корпус РН” по спектру матрицы [12].

С использованием метода конечных элементов и современных вычислительных средств в виде проблемно-ориентированного программного продукта разработана методика численного моделирования свободных колебаний новых оригинальных конструкций космических ступеней жидкостных ракет-носителей со сложной пространственной конфигурацией топливных отсеков [13-19]. Методика не имеет аналогов в Украине и является основой для выполнения теоретических прогнозов нагруженности конструкций космических ступеней и космических аппаратов в процессе выведения их на рабочие орбиты.

В мировой практике проводится только линейный анализ динамики и устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН” с использованием результатов предварительно проведенных дорогостоящих экспериментальных работ и при этом прогнозируется сам факт устойчивости или потери устойчивости системы. Однако линейный анализ устойчивости системы не может дать никакой информации о величинах амплитуд продольных колебаний жидкостных РН и, следовательно, о динамических нагрузках (продольных виброускорениях) на конструкции РН и космических аппаратов (КА). Следует отметить, что опасным является не факт возможной потери продольной устойчивости, а превышение амплитуд колебаний определенного допустимого уровня, который может диктоваться требованиями нормальной работы, например, приборов системы управления. В конечном итоге, именно возможные величины амплитуд продольных колебаний должны служить базой для принятия решений о специальных мерах по обеспечению продольной устойчивости РН с ЖРД.

На протяжении ряда лет в отделе проводились исследования, направленные на разработку нелинейной теории продольных колебаний жидкостных ракет-носителей. Были изучены нелинейности звеньев контура “ЖРДУ – корпус РН” и исследовано их влияние на ограничение амплитуд продольных колебаний. Было установлено, что при продольных колебаниях наиболее существенными являются нелинейности ЖРД и, прежде всего, нелинейности, обусловленные кавитационными явлениями в насосных агрегатах ЖРД. Главной отличительной особенностью развиваемого в отделе на протяжении ряда лет подхода к математическому моделированию и анализу продольных колебаний жидкостных РН является использование нелинейных уравнений низкочастотной динамики кавитирующего шнекоцентробежного насоса ЖРД, полученных при разработке теории кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРД. В последние годы была создана нелинейная теория продольных колебаний жидкостных РН [20, 21]. Разработана методика определения амплитуд продольных колебаний корпуса путем численного интегрирования нелинейной нестационарной системы уравнений и показано, что сильными нелинейностями, ограничивающими амплитуду продольных колебаний, являются нелинейная зависимость объема кавитационной полости в проточной части насоса ЖРД от давления и расхода на входе в насос и нелинейная зависимость напора насоса от объема кавитационной полости.

На основе развитой линейной теории продольной устойчивости жидкостных РН и созданной нелинейной теории продольных колебаний жидкостных РН в отделе были проведены следующие исследования.

Выполнены теоретические прогнозы продольной устойчивости ракет-носителей “Днепр”, “Циклон-3”, “Зенит-2SL” и “Зенит-3SL” (в рамках программы “Морской старт”), “Зенит-2SLB” и “Зенит-3SLB” (в рамках програм-

мы “Наземный старт”) с космическими аппаратами разного назначения (см. рис. 1). Следует отметить, что теоретический прогноз продольной устойчивости ракет космического назначения “Зенит-2SLB” и ”Зенит-3SLB” был проведен в 2003 г. в интересах НКАУ и по решению Совета Главных конструкторов. Разработаны практические рекомендации по обеспечению продольной устойчивости указанных ракет-носителей. Результаты теоретических прогнозов были подтверждены данными лётно-конструкторских испытаний ракет-носителей.

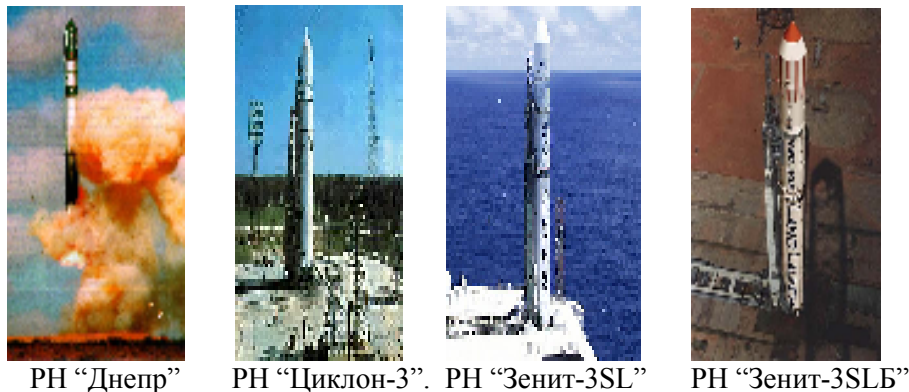


Рис. 1

Проведено математическое моделирование продольных колебаний ракет РС-20 и 11К68, ближайших прототипов РН “Днепр” и “Циклон-3М”. Впервые получено удовлетворительное согласование расчётных и экспериментальных значений амплитуд продольных колебаний этих ракет на активном участке траектории полета во время работы ЖРДУ первой ступени. Было показано, что разработанное научно-методическое и программное обеспечение для анализа продольных колебаний жидкостных РН позволяет выполнять достоверные прогнозы уровней динамических нагрузок (продольных виброускорений) на КА различных типов, которые выводятся на рабочие орбиты РН “Днепр” и РН “Циклон”, и на их основе разрабатывать рекомендации по обеспечению допустимых значений продольных виброускорений КА [20 – 22].

Космический аппарат подвергается большим динамическим нагрузкам со стороны жидкостной РН во время его запуска на рабочую орбиту. Сохранность и работоспособность КА в значительной мере зависят от уровня динамических нагрузок (продольных виброускорений), действующих на КА на активном участке траектории полета. Поэтому при создании или модернизации жидкостных РН особую актуальность приобретают работы, связанные не только с безусловным обеспечением допустимых уровней амплитуд продольных виброускорений КА на активном участке траектории полета РН во время работы ЖРДУ первой ступени, но и со снижением динамических нагрузок на КА. В отделе решена задача теоретического определения динамических нагрузок (продольных виброускорений) на КА во время старта и полета жидкостных ракет-носителей с установленной на них между верхней ступенью и космическим аппаратом пневматической системой виброзащиты, разработанной в ИТМ НАНУ и НКАУ [23]. Показано, что использование такой системы виброзащиты на ракетах-носителях “Днепр” и “Циклон-3М” обеспечивает существенное (в 3 – 5 раз) снижение уровня продольных виб-

роускорений космических аппаратов, выводимых на рабочие орбиты. Это позволяет заметно расширить возможности этих РН по выведению КА разного назначения и повысить их конкурентоспособность на мировом рынке космических услуг.

Выполнен теоретический прогноз продольной устойчивости ракеты космического назначения (РКН) “Циклон-4” с учётом изменений в конструкции ракеты, проведенных в период с 2004 г. по 2007 г. после этапа эскизного проектирования с целью увеличения её энергетических возможностей.

### **Разработка принципиально новых средств обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН**

Традиционный подход к обеспечению продольной устойчивости жидкостных РН заключается в установке газожидкостного демпфера продольных колебаний в акустически длинную питающую магистраль маршевых ЖРД с целью разнесения резонансных частот колебаний жидкости в питающей магистрали и собственных частот колебаний корпуса РН путем существенного снижения резонансных частот колебаний жидкости. Сложность решения проблемы обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН увеличивается по мере возрастания их веса и габаритов и, следовательно, снижения собственных частот колебаний корпуса РН. В этом случае необходимы газожидкостные демпфирующие устройства весьма больших объёмов. Так, например, для обеспечения продольной устойчивости сверхтяжелой РН “Энергия” многогоразовой космической системы “Энергия – Буран” потребовался газожидкостный демпфер объёмом в 500 дм<sup>3</sup>. Очевидно, что при использовании таких демпфирующих устройств возникают проблемы их размещения на ракете и увеличения веса конструкции. Это обуславливает необходимость разработки принципиально новых средств устранения продольных колебаний тяжелых РН.

В связи с этим в отделе был создан гидродинамический демпфер. Он представляет собой специальный байпасный трубопровод, соединяющий выход из преднасоса либо насоса с его входом. На входе в трубопровод установлено специальное закручивающее устройство – кавитатор-завихритель. При напорном вращательно-поступательном движении компонента топлива в указанном трубопроводе образуется кавитационная полость, которая и служит средством гашения продольных колебаний. Была разработана математическая модель рабочих процессов в гидродинамическом демпфере, на основании которой рассчитывались основные статические и динамические характеристики демпфера в широком диапазоне изменения его конструктивных параметров и режимов работы. Указанные характеристики являются необходимыми при анализе и обеспечении продольной устойчивости жидкостных РН. Полученные теоретические результаты были экспериментально подтверждены при отработке гидродинамического демпфера на специально созданных экспериментальных установках, позволяющих проводить испытания как на модельных, так и на натуральных жидкостях с использованием скоростной киносъемки протекающих процессов.

Гидродинамический демпфер прошел полный цикл экспериментальной отработки, включая и испытания в составе ЖРДУ первой ступени РН “Зенит” на первом этапе её летно-конструкторских испытаний. Указанные испытания показали, что устойчивость ракеты по отношению к продольным колебаниям была обеспечена на всех пусках, при этом максимальные амплитуды про-

дольных колебаний корпуса РН не превосходили 0,09g, что более чем в 15 раз ниже допустимых.

Следующей разработкой стал более эффективный демпфер продольных колебаний жидкостных РН – термодинамический демпфер [24]. В полости этого демпфера формируется изменяющийся объем двухфазной парожидкостной среды, находящейся вблизи линии насыщения с четко выраженной границей раздела фаз. Режим работы демпфера определяется температурой двухфазной среды в полости демпфера, которая может изменяться с помощью специального нагревателя.

Разработаны математические модели рабочих процессов в полости термодинамического демпфера при равновесных и неравновесных термодинамических процессах испарения жидкости и конденсации пара [25, 24, 26, 27], предложен механизм рассеяния колебательной энергии в демпфере [28] и проведен анализ влияния элементов конструкции демпфера на кинетику фазовых превращений [29]. Разработанные модели позволяют расчетным путем определять основные динамические характеристики, выбирать конструкцию и режимы работы демпфера. Теоретически обоснована возможность заметного повышения эффективности термодинамического демпфера путем введения в его конструкцию новых элементов – тонких металлических пластин, располагаемых в паровой полости [30, 31]. Выполнен теоретический анализ устойчивости насосной системы питания ЖРДУ при установке термодинамического демпфера в питающую магистраль на входе в насос [32].

Для проверки эффективности работы термодинамического демпфирующего устройства были созданы специальные экспериментальные установки, позволяющие опытным путем определять его динамические характеристики, основной из которых является зависимость динамической податливости демпфера от частоты вынужденных колебаний. Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические выводы о высокой эффективности работы термодинамического демпфера. Было показано, что податливость термодинамического демпфера примерно в 5 раз превышает податливость гидродинамического демпфера и примерно в 17 - 20 раз превышает податливость газожидкостного демпфера тех же габаритных размеров.

Созданные и экспериментально отработанные принципиально новые малогабаритные демпферы продольных колебаний не содержат подвижных частей, элементов автоматики и имеют лучшие по сравнению с газожидкостными демпферами динамические характеристики, что позволяет считать их высокоэффективными средствами обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН, существенно повышающими их эксплуатационную надежность.

### **Гидрогазодинамика лопаточных машин**

Разработано не имеющее аналогов в Украине научно-методическое и программное обеспечение для расчета параметров пространственных турбулентных течений жидкости в осевых и центробежных насосах жидкостных ракетных двигателей и трансзвуковых потоков воздуха в компрессорных ступенях авиационных газотурбинных двигателей, основанное на едином подходе к численному моделированию течений жидкости и газа в лопаточных машинах с использованием полных осредненных уравнений Навье-Стокса и  $k-\varepsilon$  модели турбулентности. На многочисленных примерах показано, что данное обеспечение позволяет расчетным путем исследовать сложную картину течения в лопаточных машинах и с приемлемой для практики точно-



стью прогнозировать их энергетические характеристики [33 – 38]. Научно-методическое и программное обеспечение для численного моделирования пространственных турбулентных течений газа в компрессорных ступенях авиационных ГТД было использовано в ГП “Ивченко – Прогресс” при проектировании и доводке рабочего колеса вентиляторной ступени двигателя Д-436Т1, рабочих колес центробежных ступеней компрессоров двигателей АИ-450 и Д-27 и входного устройства двигателя ТВ3-117 ВМА СБМ. Это позволило в ряде случаев сократить сроки создания указанных образцов техники за счет достаточно точного прогноза степени аэродинамического совершенства формы межлопаточных каналов осевых и центробежных компрессорных ступеней на ранних этапах проектирования (рабочие колеса осевой и центробежной ступени показаны на рис.2).

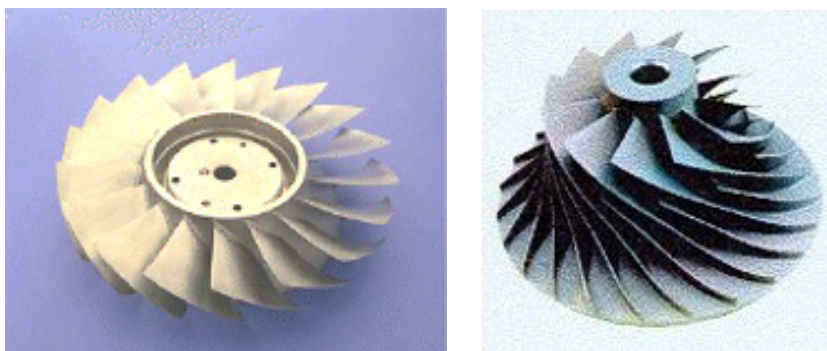


Рис. 2

Для Украины и других стран – разработчиков авиационной техники является актуальной проблема оптимизации конструкций лопаточных венцов компрессоров авиационных газотурбинных двигателей. В связи с этим в отделе развиваются подходы к решению обратной задачи газодинамики лопаточных венцов компрессоров [39 – 41]. Построена методика решения обратной краевой задачи газодинамики компрессорных решеток в двумерной постановке для дозвукового течения идеального газа в рамках приближения Чаплыгина. Исходя из необходимости достаточно точной оценки аэродинамических характеристик решеток профилей, спроектированных в результате решения обратной задачи, построена методика решения прямой задачи газодинамики компрессорных решеток в двумерной постановке, основанная на численном моделировании плоского трансзвукового турбулентного течения газа в компрессорных решетках с использованием осреднённых уравнений Навье-Стокса и модели турбулентности Спаларта-Аллмараса. Работоспособность методики проверена на тестовых задачах и подтверждена согласованием полученных расчётных результатов с имеющимися экспериментальными данными. Показано, что совместное решение прямой и обратной задачи позволяет получить удовлетворительное согласование геометрических параметров исходной и спроектированной решеток. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании лопаточных венцов компрессоров авиационных газотурбинных двигателей, что позволит существенно уменьшить затраты на экспериментальные исследования и сократить сроки разработки компрессоров.

## **Динамика гидравлических систем с кавитирующими местными гидравлическими сопротивлениями**

Ранее в отделе были проведены теоретические и экспериментальные исследования колебаний давления жидкости в гидравлических системах с кавитирующими сужающе-расширяющимися каналами местных гидравлических сопротивлений. Установлены основные характерные особенности колебаний, физическая природа которых обусловлена периодически срывной кавитацией в местных гидравлических сопротивлениях. Была создана теория высокочастотных высокоамплитудных колебаний давления жидкости в гидравлических системах с кавитирующими осесимметричными сужающе-расширяющимися каналами местных гидравлических сопротивлений. Был разработан принципиально новый генератор колебаний давления жидкости – кавитационный генератор колебаний, который представляет собой сужающе-расширяющийся канал определенной геометрии (типа трубки Вентури). Генератор колебаний не содержит подвижных и вращающихся частей и не требует подвода дополнительной энергии. Он работает в режиме периодически-срывной кавитации и преобразует стационарный поток жидкости в пульсирующий высокочастотный высокоамплитудный поток. Были исследованы возможности использования таких пульсирующих потоков жидкости для создания новых перспективных, высокопроизводительных, экологически чистых технологических процессов в различных отраслях промышленности: эмульгирования, диспергирования, бурения скважин, очистки поверхностей.

Развитие созданной ранее в отделе теории высокочастотных высокоамплитудных колебаний давления жидкости в гидравлических системах с кавитирующими местными гидравлическими сопротивлениями происходило на основе построения математических моделей разного уровня (в одномерном и двумерном приближении) данного динамического процесса, численного исследования структуры нестационарного кавитационного течения в местных сопротивлениях и целенаправленных экспериментальных исследований таких колебаний.

Выполнены экспериментальные исследования высокочастотных колебаний давления жидкости в системах с местными сопротивлениями при существенном уменьшении расхода жидкости в системе и расширении диапазона изменения давления жидкости на входе в местное сопротивление. Показано, что установленные ранее основные закономерности высокочастотных колебаний сохраняются при таком изменении давления и расхода жидкости на входе в кавитирующие местные сопротивления.

Предложены новые подходы к математическому моделированию высокочастотных высокоамплитудных колебаний давления жидкости в гидравлических системах с кавитирующими местными гидравлическими сопротивлениями. Эти подходы позволяют в одномерном приближении [42] (с использованием метода конечных элементов) и в осесимметричном приближении (на основе уравнений Навье-Стокса) воспроизвести характерные особенности высокочастотных колебаний.

Разработана методика численного моделирования кавитационного течения вязкой жидкости в осесимметричных сужающе-расширяющихся каналах местных сопротивлений гидравлических систем на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса, баротропного уравнения состояния парожидкостной смеси и с использованием координатных расчетных сеток [43]. Впервые

проведено численное моделирование кавитационных автоколебаний в гидравлической системе с трубкой Вентури с углом раскрытия диффузора  $10^\circ$ , результаты которого удовлетворительно согласовываются с имеющимися экспериментальными данными.

Выполнено численное моделирование нестационарного осесимметричного кавитационного течения в трубке Вентури с углом раскрытия диффузора  $30^\circ$ , и впервые воспроизведены характерные особенности данного течения: отрыв оседлой кавитационной каверны в диффузоре трубки Вентури, унос каверны потоком и последующее схлопывание каверны на выходе из диффузора [44]. Полученные результаты позволяют углубить понимание сути явления генерации высокочастотных высокоамплитудных колебаний давления жидкости в гидравлических системах с кавитирующими местными гидравлическими сопротивлениями.

Предложена методика численного моделирования двумерных нестационарных течений вязкой жидкости в областях сложной формы (местные гидравлические сопротивления, решетки профилей, внутренние полости лопастных насосов) на неструктурных сетках [45, 46]. Работоспособность методики продемонстрирована на ряде тестовых задач.

На основе математического моделирования (в одномерном приближении с использованием метода конечных элементов) и экспериментального исследования пульсирующих потоков жидкости в гидравлических системах с кавитирующими местными сопротивлениями установлена принципиальная возможность повышения эффективности использования энергии потока жидкости путем применения в таких системах двух последовательно расположенных кавитирующих местных сопротивлений. Полученные результаты имеют большое значение при создании новых и интенсификации существующих технологических процессов в различных отраслях промышленности на основе использования пульсирующих кавитационных потоков жидкости.

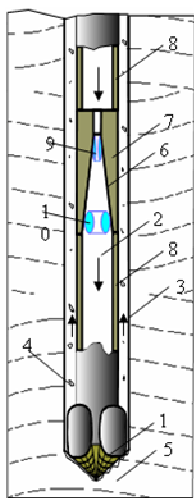


Рис. 3

Проблема интенсификации процесса бурения в твердых породах является актуальной не только в Украине и странах СНГ, но и в США, Канаде, Норвегии и других странах. Выполнен теоретический анализ возможности реализации одного из наиболее перспективных способов решения этой проблемы – способа создания осевых динамических нагрузок (продольных виброускорений) на вращательном породоразрушающем инструменте бурового снаряда с помощью оригинального, не имеющего аналогов кавитационного гидровибратора, разработанного в отделе. Высокочастотный гидровибратор не содержит подвижных и вращающихся частей и не требует подвода дополнительной энергии, что упрощает конструкцию и существенно повышает надёжность его функционирования. Проведено математическое моделирование динамических процессов в буровом снаряде с кавитационным гидровибратором с использованием развитой теории высокочастотных высоко-

амплитудных колебаний давления жидкости в гидравлических системах с кавитирующими осесимметричными сужающе-расширяющими каналами местных гидравлических сопротивлений [42, 47]. На рис. 3 представлена принципиальная схема бурового снаряда с высокочастотным кавитационным

гидровибратором и приняты следующие обозначения: 1 – породоразрушающий инструмент; 2 – промывочная жидкость; 3 – скважина; 4 – частицы выбуренной горной породы; 5 – горная порода; 7 – кавитационный гидровибратор; 8 – конструкция бурового снаряда; 9 – кавитационные образования; 10 – оторвавшаяся часть кавитационных образований. Исследованы характеристики высокочастотных кавитационных гидровибраторов [48 – 50]. Выполнены экспериментальные исследования макетных образцов бурового снаряда с кавитационным гидровибратором. Получено удовлетворительное согласование расчётных и экспериментальных значений продольных виброускорений конструкции бурового снаряда с кавитационным гидровибратором.

1. *Пилипенко В. В.* Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем / *В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, М. С. Натанзон.* – М. : Машиностроение, 1977. – 352 с.
2. *Пилипенко В. В.* Кавитационные автоколебания / *В. В. Пилипенко.* – Киев : Наук. думка, 1989. – 316 с.
3. Динамика жидкостных ракетных двигательных установок и продольная устойчивость жидкостных ракет-носителей / *В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, Н. И. Довгоцько, Ю. Е. Григорьев, И. К. Манько, О. В. Пилипенко* // *Техническая механика.* – 2001. – №2. – С.11 – 37.
4. *Pilipenko V.V., Semenov Yu. A., Pilipenko O.V.* Study of Hydrodynamic Cavitation in Inducer Centrifugal Pump // *Proc. Third Int. Symp. on Cavitation.* – Grenoble (France), 1998. – Vol.1. – P. 323–328.
5. *Пилипенко В. В.* К определению передаточной матрицы кавитирующего шнекоцентробежного насоса / *В. В. Пилипенко, Ю. А. Семенов* // III-я Международная конференция по насосам и вентиляторам, октябрь, 1998, Пекин, Китай. – Пекин, Китай : Университет Циньгуа.
6. *Пилипенко В. В.* Устойчивость кавитационного обтекания решетки пластин / *В. В. Пилипенко, Ю. А. Кваца* // *Техническая механика.* – 2001. – №2. – С. 144 – 149.
7. *Пилипенко В. В.* Несимметричное кавитационное течение в шнеке / *В. В. Пилипенко, О. В. Пилипенко, Ю. А. Семенов* // *Техническая механика.* – 2003. – №1. – С.15 – 29.
8. *Пилипенко В. В.* Экспериментально-расчетное определение коэффициентов уравнения динамики кавитационных каверн в шнекоцентробежных насосах различных типоразмеров / *В. В. Пилипенко, С. И. Долгополов* // *Техническая механика.* – 1998. – Вып. 8. – С. 50 – 56.
9. *Пилипенко В.В.* Математическое моделирование запуска жидкостного ракетного двигателя РД-8 с учетом кавитации в насосах / *В. В. Пилипенко, С. И. Долгополов* // *Техническая механика.* – 2003. – №2. – С. 18 – 24.
10. *Николаев А.Д.* Определение параметров собственных продольных колебаний конструкции корпуса жидкостных ракет-носителей с учетом диссипации энергии / *А. Д. Николаев, Н. В. Хоряк* // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2004. – № 4(12). – С. 62 – 73.
11. *Хоряк Н.В.* Декомпозиция и анализ устойчивости динамической системы “питающие магистрали – маршевый ЖРД с окислительной схемой дожигания генераторного газа” / *Н. В. Хоряк, А. Д. Николаев* // *Техническая механика.* – 2007. – №1. – С.28 – 42.
12. *Хоряк Н.В.* Анализ устойчивости многоконтурной динамической системы “ЖРД–корпус РН” по спектру матрицы: методические основы и приложение / *Н. В. Хоряк* // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2007. – № 9(45). – С.87 – 91.
13. Влияние продольных вибраций космической ступени РН на работоспособность внутрибаковых устройств обеспечения сплошности компонентов топлива в системе питания маршевого двигателя / *И. Д. Блоха, А. Н. Заволока, А. Д. Николаев, О. В. Пилипенко, Н. Ф. Свириденко, Б. А. Шевченко* // *Техническая механика.* – 2005. – № 2. – С.65 – 74.
14. Численное моделирование свободных пространственных колебаний жидкости в емкостях сложной конфигурации / *И. Д. Блоха, А. Д. Николаев, Г. И. Богомаз, С. А. Сирота* // *Науковий вісник НГУ.* – 2006. – № 6. – С. 75 – 80.
15. *Блоха И. Д.* Determination of the propellant slosh parameters for rocket propulsion system of the space stage with complex spatial tanks configuration / *И. Д. Блоха, А. Д. Николаев* // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2006. – № 10(36). – С. 42 – 44.
16. Численное моделирование свободных колебаний космических ступеней жидкостных РН со сложной пространственной конфигурацией топливных баков / *В. В. Пилипенко, О. В. Пилипенко, И. Д. Блоха, Г. И. Богомаз, А. Д. Николаев* // *Техническая механика.* – 2006. – № 2. – С. 69 – 81.
17. *Блоха И. Д.* Определение параметров собственных продольных колебаний космических ступеней ракет-носителей со сложной пространственной конфигурацией отсеков / *И. Д. Блоха* // *Вісник Дніпропетровського університету. Ракетно-космічна техніка.* – 2006. – Вып. 9, №8. – С. 106 – 113.
18. Развитие сложных пространственных колебательных движений жидкости в цилиндрическом баке при резонансном возбуждении системы “конструкция бака – жидкость” / *Г. И. Богомаз, С. А. Сирота, И. Д. Блоха, А. Д. Николаев* // *Техническая механика.* – 2007. – №1. – С. 81 – 89.
19. Продольные колебания верхней ступени и проблема продольной устойчивости жидкостной ракеты-носителя / *И. Д. Блоха, А. Д. Николаев, Н. В. Хоряк, А. С. Белецкий* // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2007. – № 7(43). – С. 175 – 177.

20. *Pilipenko V. V.* Theoretical determination of amplitudes of longitudinal vibrations of Liquid Propellant Launch vehicles / *V. V. Pilipenko* // 49-th IAF International Astronautical congress, September 28 – October 2, 1998, Melbourne, Australia. – IAF – 98 – I.2.10.
21. Теоретическое определение амплитуд продольных колебаний жидкостных ракет-носителей / *В. В. Пилипенко, Н. И. Довгоцько, С. И. Долгополов, А. Д. Николаев, В. А. Серенко, Н. В. Хоряк* // Космічна наука і технологія. – 1999. – Т.5, №1. – С.90 – 96.
22. Теоретическое определение динамических нагрузок (продольных виброускорений) на конструкцию жидкостной ракеты РС-20 на активном участке траектории ее полета / *В. В. Пилипенко, Н. И. Довгоцько, А. Д. Николаев, С. И. Долгополов, Н. В. Хоряк, В. А. Серенко* // Техническая механика. – 2000. – №1. – С.3 – 18.
23. Теоретическая оценка эффективности пассивной системы виброзащиты космических аппаратов при продольных колебаниях ракеты-носителя / *В. В. Пилипенко, А. Д. Николаев, Н. И. Довгоцько, О. В. Пилипенко, С. И. Долгополов, Н. В. Хоряк* // Техническая механика. – 2001. – №1. – С. 5 – 12.
24. *Пилипенко О. В.* Математическое моделирование неравновесных рабочих процессов в термодинамическом демпфере продольных колебаний жидкостных ракет / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 1997. – №6. – С.33 – 39.
25. *Пилипенко О. В.* Математическое моделирование равновесных термодинамических процессов в кавитационной полости закрученного потока жидкости в цилиндрическом трубопроводе / *О. В. Пилипенко* // Динамика гидромеханических систем летательных аппаратов. – Киев : Наук. думка, 1992. – С. 114 – 119.
26. *Пилипенко О. В.* Математическое моделирование равновесных термогидродинамических процессов двухфазного течения закрученного потока жидкости в цилиндрическом трубопроводе / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2005. – № 2. – С. 30 – 37.
27. *Пилипенко О. В.* Учет неравновесных фазовых превращений в математической модели двухфазного течения жидкости в цилиндрическом трубопроводе / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2007. – №1. – С. 3 – 9.
28. *Пилипенко О. В.* Механизм рассеяния колебательной энергии в термодинамическом демпфере продольных колебаний жидкостных ракет / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2000. – №1. – С.143 – 149.
29. *Пилипенко О. В.* Уравнение кинетики фазовых превращений в термодинамическом демпфере продольных колебаний жидкостных ракет / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2001. – №1. – С.174 – 180.
30. *Пилипенко О. В.* Уравнение динамики двухфазной среды при различных временах релаксации жидкости, пара и элементов конструкции термодинамического демпфера / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2001. – № 2. – С. 139 – 143.
31. *Пилипенко О. В.* Определение динамической податливости термодинамического демпфера при различных временах релаксации температурных полей жидкости, пара и элементов конструкции / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2002. – № 1. – С. 70 – 75.
32. *Пилипенко О. В.* Определение границы области устойчивости гидравлической системы с подключенным трубопроводом с двухфазной парожидкостной средой / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2008. – № 1. – С. 3 – 8.
33. *Письменный В. И.* Расчет трехмерного турбулентного течения воздуха в межлопастных каналах центробежного колеса компрессора / *В. И. Письменный, Ю. А. Кваша, Н. Р. Дорошенко* // Авиационно-космическая техника и технология: Тепловые двигатели и энергоустановки. – 1998. – Вып. 5 – С. 239 – 243.
34. *Кваша Ю. А.* Расчет пространственного турбулентного потока в межлопаточных каналах сверхзвуковых компрессорных ступеней / *Ю. А. Кваша* // Техническая механика. – 1999. – №1. – С. 9 – 13.
35. *Pilipenko V. V.* Numerical Simulation of Three-Dimensional Viscous Flow in Aerodynamic Designing of Compressor Stages / *V. V. Pilipenko, V. I. Pismenny, Yu. A. Kvasha* // Proc. XIV Int. Symp. on Airbreathing Engines, Florence, Italy. – 1999. – P. 5.
36. *Кваша Ю. А.* Расчет пространственного турбулентного потока в центробежном колесе с учетом концевго зазора / *Ю. А. Кваша* // Авиационно-космическая техника и технология: Тепловые двигатели и энергоустановки. – 2000. – Вып. 19 – С. 108 – 111.
37. *Кваша Ю. А., Дячкин А.А.* Расчет аэродинамических характеристик компрессорных решеток / *Ю. А. Кваша, А. А. Дячкин* // Техническая механика. – 2001. – №1. – С. 58 – 63.
38. *Письменный В. И.* Расчет трехмерного турбулентного потока воздуха в центробежной ступени компрессора / *В. И. Письменный, Ю. А. Кваша* // Техническая механика. – 2004. – №2. – С. 94 – 99.
39. *Мелашич С. В.* Особенности построения эффективной разностной схемы для численного моделирования трансзвуковых течений вязкого газа в компрессорных решетках / *С. В. Мелашич* // Вісник ДНУ. – 2007. – № 9/2. – С. 78 – 86.
40. *Мелашич С.В.* Особенности решения обратных краевых задач гидродинамики решеток профилей при различных граничных условиях / *С. В. Мелашич* // Техническая механика. – 2008. – №1. – С.115 – 123.
41. *Кваша Ю. А.* Исследование влияния граничных условий на решение обратных задач гидродинамики решеток профилей / *Ю. А. Кваша, С. В. Мелашич* // Математичні проблеми технічної механіки – 2008 : Матеріали міжнародної наукової конференції, апрель, 2008 г., г.г. Днепропетровск – Днепродзержинск : сб. трудов. – Днепропетровск, 2008. – С. 32 – 33.

42. *Pilipenko O. V.* Use of the cavitation pulse generator of high-frequency, high-amplitude self-oscillations for dispersing suspensions / *O. V. Pilipenko, L. G. Zapols'ky, Yu. A. Kvasha* // Proc. Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003), November 1-4, 2003, Osaka, Japan. – Osaka, 2003. – P. 6.
43. *Кваша Ю. А.* Численное моделирование нестационарного осесимметричного кавитационного течения в сужающе-расширяющихся каналах местных гидравлических сопротивлений / *Ю. А. Кваша, Н. В. Болотова* // Техническая механика. – 2004. – № 1. – С. 96 – 101.
44. *Болотова Н. В.* Численное моделирование нестационарных процессов в кавитационном генераторе колебаний давления жидкости / *Н. В. Болотова* // Вісник ДНУ. Механіка. – 2006. – Т. 1, Вып. 10, № 2/1. – С. 120 – 126.
45. *Болотова Н. В.* Построение неструктурных расчетных сеток с треугольными элементами в плоских многосвязных областях / *Н. В. Болотова* // Техническая механика. – 2006. – № 1. – С. 115 – 118.
46. *Пилипенко О. В.* Расчет двумерных течений вязкой жидкости на неструктурных сетках / *О. В. Пилипенко, Ю. А. Кваша, Н. В. Болотова* // Техническая механика. – 2007. – № 2. – С. 3 – 7.
47. *Манько И. К.* Математическое моделирование продольных колебаний бурового снаряда с высокочастотным кавитационным гидровибратором / *И. К. Манько, А. Д. Николаев* // Науковий вісник НГУ. – 2004. – № 11. – С. 65 – 73.
48. Характеристики высокочастотного кавитационного гидровибратора для создания динамических нагрузок на породоразрушающем инструменте бурового снаряда / *В. В. Пилипенко, И. К. Манько, С. И. Долгополов, А. Д. Николаев* // Науковий вісник НГУ. – 2005. – № 8. – С. 66 – 70.
49. Влияние расхода жидкости на параметры продольных виброускорений высокочастотного кавитационного гидровибратора / *В. В. Пилипенко, И. К. Манько, С. И. Долгополов, А. Д. Николаев* // Науковий вісник НГУ. – 2006. – № 2. – С. 36 – 39.
50. Обобщение экспериментальных характеристик высокочастотных кавитационных гидровибраторов / *В. В. Пилипенко, И. К. Манько, С. И. Долгополов, А. Д. Николаев* // Науковий вісник НГУ. – 2007. – № 8. – С. 67 – 71.

Институт технической механики  
НАН Украины и НКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 24.09.08,  
в окончательном варианте 25.09.08