

**ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ В ТРУДАХ КАФЕДРЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
МЕХАНИКИ ИМЕНИ ПРОФЕССОРА
Н.Е. ЖУКОВСКОГО**

Приведен краткий обзор работ сотрудников кафедры теоретической механики МГТУ им. Н.Э. Баумана в области динамики гидромеханических систем за последние 50 лет как продолжение и развитие исследований в данном направлении основателя кафедры профессора Н.Е. Жуковского.

Email: spm@bmstu.ru

Ключевые слова: гидродинамика, гидроупругость, гидроудар, кавитация, двухфазные течения, волны поверхностные, математическое моделирование, колебания, оптимизация глобальная.

Основатель кафедры теоретической механики Императорского Московского технического училища (ИМТУ) Николай Егорович Жуковский оставил глубокий след в фундаментальных исследованиях по аэро- и гидромеханике [1]. Наиболее известные из них посвящены вычислению подъемной силы крыла; описанию обтекаемого профиля, испытывающего сопротивление в потоке газа и жидкости; расчету гидроудара в трубопроводах; рассмотрению движения твердого тела, имеющего полости, наполненные однородной капельной жидкостью, а также многим другим задачам, не утрачивающим актуальность для науки и техники в современных условиях.

Отличительная черта всех исследований великого ученого — неразрывная связь открытых им фундаментальных законов с прикладными задачами, конкретными расчетами процессов, разработками технических устройств и механизмов. Кроме того, многие новые задачи входили в читаемые профессором Н.Е. Жуковским учебные курсы для студентов ИМТУ и Московского университета. Используемая в выводах Учителя строгость математических решений, опирающихся на физический эксперимент, сочеталась с наглядной интерпретацией результатов на основе упрощенных моделей явлений, отражающих их физическую суть. Эти традиции, заложенные основателем кафедры, поддерживались в течение всего времени существования кафедры теоретической механики, которую Н.Е. Жуковский возглавлял с 1878 г. в течение 43 лет.

В 1885 г. в журнале Русского физико-химического общества была опубликована работа Н.Е. Жуковского «О движении твердого тела, имеющего полости, наполненные однородной капельной жидкостью». К этому времени в научной литературе имелись лишь некоторые упоминания о движениях твердых тел с жидкими массами, расположенными

ми внутри тел, например, в работах таких известных ученых, как Стокс (1841), Гельмгольц (1860), Неймарк (1883). Упомянутую работу Н.Е. Жуковского нельзя отнести к работам, обусловленным развитием техники или требованиями физиков-экспериментаторов того времени, она выполнена Н.Е. Жуковским по личной инициативе и, очевидно, чисто из любознательности настоящего ученого. Практическое использование результатов этой работы нашло место лишь спустя много лет, именно с появлением ракетно-космической техники и возникновением задач о влиянии жидкого наполнения на движение ракетносителей [2].

В разное время на кафедре работали преподавателями и соавторами многие ученые, проводившие исследования в области традиционных для кафедры научных направлений по динамике гидромеханических систем. Начиная с 60-х годов прошлого века значительная часть исследований была связана с потребностями бурно развивающейся ракетно-космической техники. Стали разрабатываться такие научные направления, как динамика ракет с жидкостными двигателями большой мощности, включая продольные и поперечные колебания конструкции с учетом динамики жидкости в баках; устойчивость и автоколебания систем управления движением, а также систем топливоподачи, в том числе с учетом двухфазности потока и кавитации в шнекоцентробежных насосах.

В начале 1960-х годов были изданы работы академика К.С. Колесникова [3, 4], в которых наглядно демонстрировалось воздействие жидкого наполнения на динамику летательных аппаратов. Для решения задач динамики сложных упругих систем он разработал упрощенные математические модели, учитывающие колебания топлива в баках на основе маятниковых аналогий. В этом случае механическим аналогом является бесконечная система параллельных осцилляторов (маятников). Считается (постулируется), что для i -го осциллятора частота его собственных колебаний равна частоте i -го тона собственных поперечных колебаний жидкости в баке. Параметры аналога определяют энергетическим методом, т. е. сравнением для i -го тона

колебаний полной механической энергии аналога и исходной гидромеханической системы. В качестве примера на рис. 1 показана схема для расчета механического аналога колебаний жидкости в баке.

Механическим аналогом для осесимметричных колебаний упругого бака с жидкостью при соответствующей нормировке собственных функций в потенциале скорости частиц жидкости в общем случае является бесконечная совокупность параллельных осцилляторов (гру-

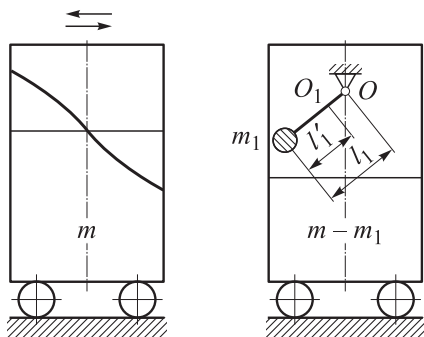


Рис. 1 Схемы колебаний жидкости в баке при движении в поперечном направлении и механического маятникового аналога

зов, подвешенных на пружинах), сумма масс которых равна физической массе жидкости в упругом баке с жидкостью. Обычно в практических расчетах достаточно ограничиться введением нескольких маятников с собственными частотами, соответствующими первым двум, максимум трем, тонам колебаний жидкости. На рис. 2 и 3 представлены схемы объектов и их модельные механические аналоги для проведения расчетов.

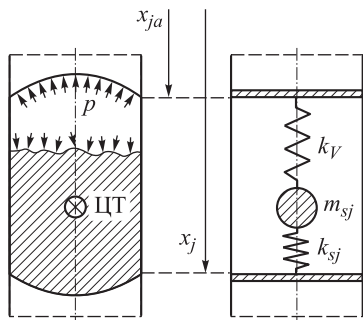


Рис. 2. Схема бака с жидкостью и его механическая модель для одного из тонов колебаний (ЦТ — центр тяжести)

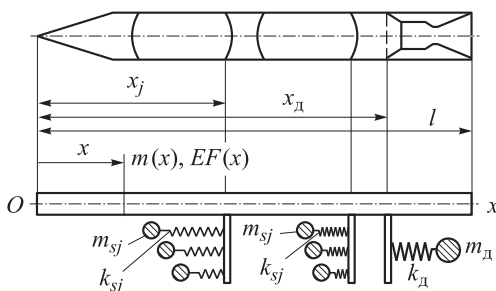


Рис. 3. Схема ракеты с жидкостным двигателем и ее расчетная модель с учетом трех тонов колебаний жидкости в баках

Этот подход на кафедре развивали профессор А.А. Пожалостин [5], доценты В.Е. Самодаев [6, 7], М.М. Ильин, В.И. Дронг и другие, которые в то время были аспирантами заведующего кафедрой К.С. Колесникова. С его помощью можно решать многие актуальные задачи продольных и поперечных колебаний конструкции ракеты с достаточной степенью точности при существующих методах численных расчетов. Монографии К.С. Колесникова [8, 9], обобщающие результаты многолетних исследований в данном направлении, стали настольными книгами во многих научных коллективах.

В рамках решения задачи гидроупругости в работах профессора А.А. Пожалостина [10—14] был предложен приближенный аналитический метод определения динамических характеристик упругой оболочки с жидкостью. Математическая модель построена с применением гармонических полиномов Лапласа. Введена система функций в явной форме, точно удовлетворяющая естественным краевым условиям этой вариационной задачи. Получены аналитические решения для односвязных и двухсвязных полостей. Кроме того, разработан экспериментально-теоретический метод для определения декремента колебаний бака с жидким наполнением с учетом тензора вязких напряжений, а также создана модель гидроаккумуляторного демпфера. В настоящее время под руководством А.А. Пожалостина аспирантом Д.А. Гончаровым проводятся исследования по разработке методов расчета динамики бака с упругими фазоразделяющими элементами при микрогравитации.

Развитием классической задачи Н.Е. Жуковского о динамике твердых тел, имеющих полости, наполненные жидкостью, являются работы [15—19]. В них были поставлены и решены некоторые задачи гидродинамики неоднородной идеальной несжимаемой жидкости, заполняющей полностью или частично произвольную полость в подвижном твердом теле, а также задачи динамики твердого тела с жидкостью в общей постановке.

В работах доцента А.Н. Темнова [15—17] рассмотрены случаи, когда жидкость в полости совершает квазипотенциальное движение, однородное вихревое либо малое вихревое движения. При квазипотенциальном движении механический эффект неоднородной жидкой массы оказывается эквивалентен действию «затвердевшей» жидкости и твердого тела, обладающего своим количеством и моментом количества движения, присоединенных к несущему твердому телу и образующих в совокупности систему твердых тел. Эффект неоднородной жидкости, совершающей однородное вихревое движение, тождественен эффекту присоединенного вращающегося твердого тела, центр масс которого изменяет свое положение относительно несущего твердого тела. Гидродинамическое воздействие неоднородной жидкости при малых движениях определяется счетным множеством парциальных движений жидкости, зависящих от изменения плотности в невозмущенном состоянии. Результаты исследований динамики тел с жидкостью нашли применение в геодинамических задачах о Земле [18].

В работах доцентов Ю.Д. Плешакова и Е.А. Брусенцовой [19] найден ряд новых интегрируемых случаев уравнений Жуковского — Пуанкаре, описывающих движение тела с полостями, наполненными жидкостью. Полученные решения включают в себя в качестве частных результатов классические случаи интегрируемости Клебша — Шоттки (1891), Ляпунова — Стеклова (1909), Адлера — ван Мербеке (1982).

Исследования Н.Е. Жуковского, связанные с образованием волн на поверхности жидкости, также относятся к фундаментальным задачам гидродинамики, имеющим множество приложений, в том числе для двухфазных и кавитационных течений.

Цикл исследований, проведенный профессорами — совместителями кафедры С.Я. Секерж-Зеньковичем и В.А. Калиниченко, посвящен экспериментальному и теоретическому изучению волновой неустойчивости Кельвина — Гельмгольца [20, 21] и волн Фарадея [22—25]. Последний термин в гидродинамике определяет стоячие поверхностные волны, возбуждаемые при параметрическом резонансе в жидкости, подверженной вертикальным колебаниям. Частота этих волн кратна половине частоты колебаний сосуда с жидкостью, причем в отличие от вынужденных стоячих волн учет только нелинейных эффектов позволяет определить характеристики установившегося волнового режима. Методами экспериментальной и теоретической гидродинамики исследованы гравитационные волны Фарадея на свободной поверхности однородной жидкости и на границе разде-

ла двухслойной жидкости. Предложены теоретические модели, описывающие наблюдаемые в эксперименте явления. Установлены новые и малоизученные эффекты в поверхностных и внутренних волнах Фарадея: механизмы разрушения поверхностных и внутренних волн, наличие медленных вторичных стационарных течений в колеблющейся жидкости, эффект критической глубины для поверхностных волн, эффект срыва параметрических колебаний жидкости.

При исследовании гидравлического удара — процесса резкого изменения давления в жидкости, вызванного изменением скорости ее течения в трубопроводе при быстром перекрытии потока, — описание одномерного движения идеальной сжимаемой жидкости в прямой трубе с учетом упругости стенок было получено Н.Е. Жуковским с использованием общих теорем динамики в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} &= \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} + v \frac{\partial v(x, t)}{\partial x}, \\ \rho a^2 \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} &= \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} + v \frac{\partial p(x, t)}{\partial x}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь p, v, ρ — давление, скорость и плотность жидкости; x, t — продольная координата трубопровода и время соответственно. Скорость распространения волны гидроудара

$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{k} + \frac{2r\rho}{eE_M}}}, \quad (2)$$

где ρ, k — сжимаемость жидкости; E_M — модуль Юнга материала трубопровода; r, e — радиус и толщина стенки трубопровода соответственно.

Максимальное изменение давления при гидроударе

$$\Delta p = \rho v_0 a, \quad (3)$$

где v_0 — скорость установившегося движения потока.

Проведенные расчеты были с блеском подтверждены в ходе знаменитых натуральных испытаний на Московской водокачке.

Задача о расчете гидроудара, связанная с общей задачей прочностного и динамического расчета гидросистем различного назначения, не утрачивает своей актуальности до сих пор. Разрабатываются новые модели этого явления и эффективные методы численных расчетов волновых процессов в разветвленных гидравлических системах. Выявляются и анализируются важные особенности динамических процессов, наряду с методами и способами борьбы с гидроударом и его использованием в технике. Ввиду особой важности влияния гидроудара на функционирование топливных систем жидкостных ракет эти вопросы рассмотрены в работе [26]. Рассмотрен случай, когда после сра-

батывания отсечного устройства пульсации давления в трубопроводе равны нулю [27]. Для этой цели предлагается специально подбирать закон изменения площади проходного сечения трубопровода за время, соизмеримое с периодом первого тона собственных упругих колебаний жидкости в трубопроводе.

Доцент Н.И. Бондаренко выполнил расчет гидроудара в сложных разветвленных гидросистемах на основе явной конечно-разностной схемы [28]. Кроме того, он указал на возможность прекращения колебаний давления в трубопроводе после его полного закрытия, если время перекрытия трубопровода равно четному числу фаз гидравлического удара.

Уравнения (1) в линеаризованном виде используют для решения задач об акустических колебаниях потока сжимаемой жидкости в трубопроводе, а формула (2) соответствует одной из форм записи выражения для скорости звука в этой системе. На основании этого академик К.С. Колесников, профессора В.Н. Баранов, В.Г. Кинелев, П.М. Шкапов, доценты В.И. Дронг, Е.Н. Солохин, Ю.М. Степанчук, старший научный сотрудник С.Л. Перов сформулировали и решили важные практические задачи динамики трубопроводных гидросистем по изучению устойчивости и нахождению их динамических характеристик (собственных частот, АЧХ, ФЧХ и др.), а также исследованию автоколебаний в отдельных контурах.

В ранних работах академика К.С. Колесникова [29, 30] были рассмотрены вынужденные колебания жидкости в прямолинейном трубопроводе как один из важных вопросов для топливных систем летательных аппаратов, а в статье [31] кратко изложена теория продольных колебаний жидкостной ракеты. В результате обобщения большого объема теоретических и экспериментальных (стендовых и натуральных) исследований было показано, что ракета потенциально является автоколебательной системой, в которой основным источником продольных колебаний является упругий корпус ракеты с жидким топливом в баках, источником энергии — мощный жидкостный ракетный двигатель, обратной связью — система подачи топлива от баков к двигателю. Результаты этих исследований в качестве отдельных глав вошли в монографию [9].

В.Н. Барановым совместно с Ю.Е. Захаровым методом теории струйного обтекания, разработанным Н.Е. Жуковским, теоретически и экспериментально решены задачи о взаимодействии твердых тел различных геометрических форм с идеальной и реальной жидкостью. Результаты этих исследований широко применяют на практике при расчете и конструировании электрогидравлических вибрационных механизмов. По данному научному направлению было защищено несколько диссертаций и выполнено более десяти дипломных студенческих проектов.

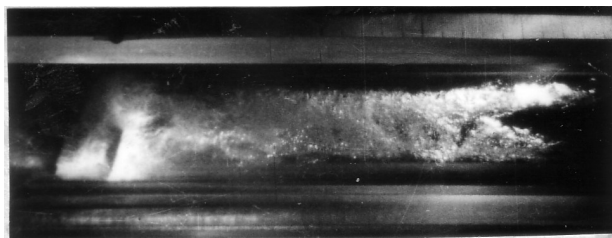
В 1970—1990-х годах на кафедре под руководством академика К.С. Колесникова и профессора В.Г. Кинелева были проведены ис-

следования, связанные с влиянием кавитации в осевых насосах на динамику топливных систем [32—36]. В этих работах также прослеживается связь с исследованиями Н.Е. Жуковского, его моделью струйных и кавитационных течений, вихревой моделью обтекания профиля крыла.

На основании результатов специально проведенных визуальных и фотографических исследований развития кавитации в межлопастных каналах шнековых насосов было выявлено, что основными структурными составляющими кавитационного течения жидкости на лопасти насоса являются присоединенная профильная каверна и кавитационные образования, содержащиеся в объеме концевой вихря, формирующегося в результате сворачивания щелевого потока с напорной стороны лопасти на всасывающую (рис. 4, *а*). На режимах пониженных подач с обратными токами присоединенная каверна немного деформируется, а концевая завихренность выносится обратными токами в подводный патрубок, где образует систему вращающихся кавитирующих макровихрей, число которых равно числу лопастей насоса (рис. 4, *б*).



а



б

Рис. 4. Фотографии кавитационного течения на лопасти насоса, работающего на режимах без обратных токов (*а*) и кавитирующих макровихрей в зоне обратных токов на входе насоса, работающего на режиме пониженной подачи (*б*)

В динамической модели присоединенной каверны на лопасти шнекового насоса выделяется собственно каверна и область ее замыкания в виде вихревого следа. На рис. 5 представлена введенная В.Г. Кинелевым схема этой структурной составляющей кавитационного течения в межлопастных каналах шнекового насоса: выделена собственно присоединенная каверна длиной l_k на входной кромке ло-

пасти, показаны эпюры распределения скоростей потока w в пограничном слое на поверхности каверны и в завихренном течении в ее следе длиной l_c .

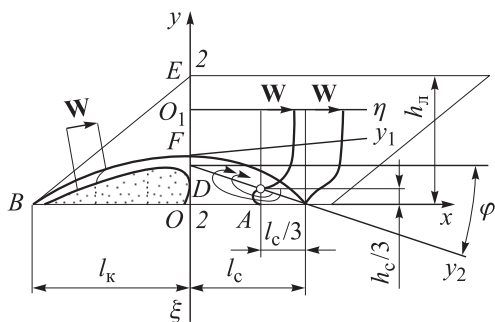


Рис. 5 Схема течения с присоединенной каверной на лопасти шнекового насоса

Схематизация течения в зоне обратных токов, соответствующая течению, изображенному на рис. 4, б, и расчетная модель для определения объема свободной парогазовой фазы в этой области приведены на рис. 6.

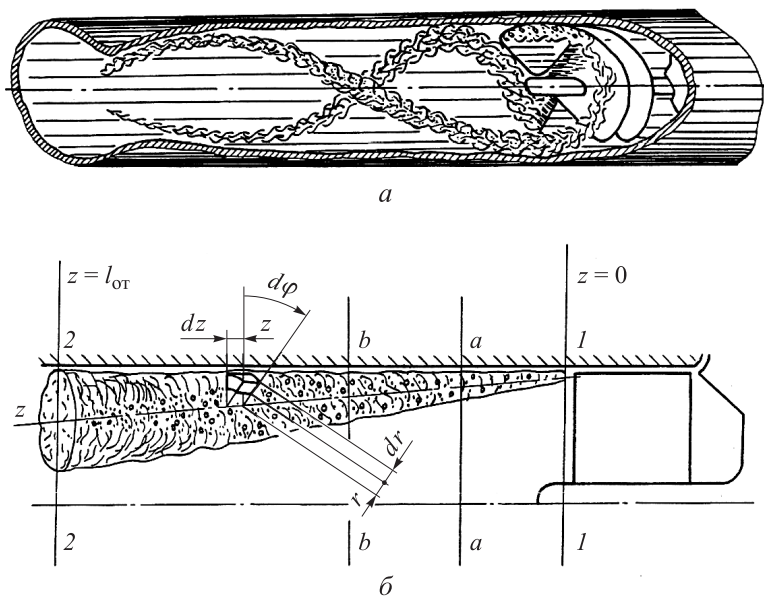


Рис. 6. Схема кавитационного течения в зоне обратных токов (а) и расчетная схема для определения объема свободной парогазовой фазы в кавитирующих макровихрях (б)

Согласно результатам исследований, опирающимся на введенную схематизацию, отражающую реальные формы кавитационных течений в рассматриваемых системах, были разработаны основы прикладной теории автоколебательных процессов в насосах при кавитации, вскрыты механизмы колебательных процессов, обусловленные

явлением нестационарной кавитации и прецессионным движением концевых вихрей в зоне обратных токов. Как показывает анализ публикаций последних лет, интерес к этой тематике вызван не только развитием ракетно-космической отрасли, но и широким применением насосных систем для перекачки нефтепродуктов в системах охлаждения мощных энергетических установок.

В работах доцента Ю.М. Степанчука рассмотрена возможность возникновения автоколебаний в замкнутой системе топливоподачи в виде трубопровода и наддуваемого расходного бака [37]. Кроме того, им разработана математическая модель этой системы и создана лабораторная экспериментальная установка.

Уточнение расчетов динамических характеристик топливных систем связано с учетом возможной двухфазности потока рабочей жидкости. Из-за наличия в жидкости даже малого количества свободной газовой фазы скорость звука смеси существенно уменьшается, в то время как ее плотность практически не отличается от плотности капельной жидкости. Кроме того, во многих практических случаях объемное газосодержание двухфазной смеси распределено по продольной координате трубопроводов неоднородным образом, так что сжимаемость смеси и, следовательно, скорость звука являются функцией продольной координаты трубопровода:

$$a = a(x).$$

Влияние монотонной зависимости скорости звука от продольной координаты трубопровода на спектр собственных частот рассмотрено в работе [38], на вид и свойства частотных характеристик гидросистем — в работах [39, 40], на границы областей устойчивости — в работе [41]. Выявлены также «зоны непрозрачности» гидролиний по отношению к малым возмущениям при монотонном и периодическом изменении волнового сопротивления или проходного сечения гидролинии по продольной координате [40].

Еще одно направление исследований кавитационных течений связано с изучением динамики развитой ограниченной искусственной газовой каверны. Каверны такого вида возникают в трубопроводе в результате подачи газа за кавитатор или непосредственно струей в поток жидкости и ограничены в своем радиальном развитии стенками магистрали, а в осевом — расположенными ниже по потоку местными гидросопротивлениями в виде сужений проходного сечения магистрали, поворотов потока, а также подсоединением нагрузочных агрегатов. Течения с искусственными газовыми кавернами в неограниченных потоках и однородных протяженных магистралях во многих случаях сопровождаются колебаниями, которые носят локальный характер. При видимом существенном изменении формы и размеров каверн пульсации давления внутри каверны и в окружающем потоке являются при этом незначительными.

В случае ограничения развития каверны в осевом направлении из-за наличия в гидрوليнии ниже по потоку местных гидросопротивлений пульсации становятся более выраженными, охватывают всю гидросистему и в предельном случае переходят в релаксационный режим в виде последовательных гидроударов с периодическим изменением средней осевой скорости потока жидкости вплоть до изменения ее направления. Детальное изучение динамики рассматриваемых течений с визуализацией потока позволило уточнить структуру ограниченных искусственных каверн при колебаниях (рис. 7, а) и предложить схему для формирования математической модели (рис. 7, б).

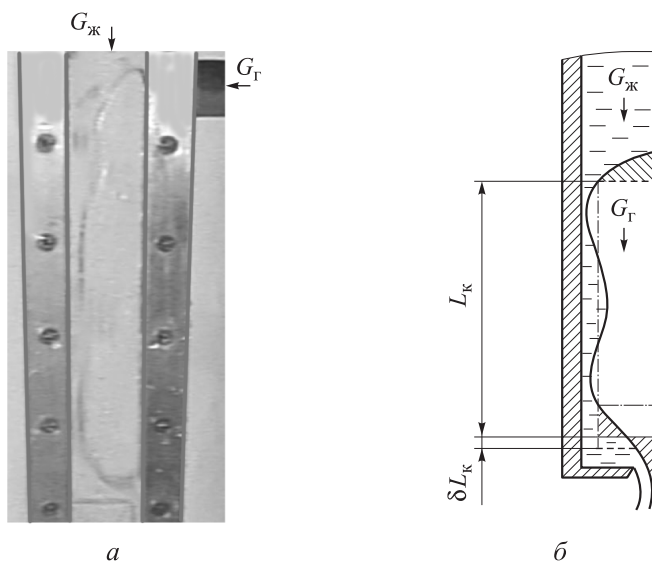


Рис. 7. Фотография ограниченной газовой каверны при одностороннем поперечном вдуве газа в плоский канал (а) и схема течения для формирования математической модели (б) ($G_{ж}$ — расход жидкости; $G_{г}$ — расход газа)

На этой основе дано описание ограниченной искусственной газовой каверны в форме обыкновенного дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом [42], исследованы устойчивость локального кавитационного образования и гидросистем с такого рода течениями [43]. Одним из основных элементов математической модели является время запаздывания τ движения поверхностной волны возмущения по границе каверны от кавитатора до замыкающего местного гидросопротивления:

$$\tau = L_{к} / v_{ф},$$

где $L_{к}$ — длина каверны, $v_{ф}$ — фазовая скорость движения волны возмущения сносного типа (рис. 7, б).

В связанной колебательной системе гидрوليния — ограниченная искусственная газовая каверна — выступает в роли генератора коле-

баний. Учет нелинейностей в рассматриваемой системе позволил рассчитать значения частот и амплитуд автоколебаний. Все это нашло отражение в разработке метода и создании устройств для генерирования колебаний в гидросистеме.

В работах профессоров П.М. Шкапова, И.Г. Благовещенского, старших преподавателей В.Д. Сулимова и Е.Б. Гартиг при участии студентов проведены исследования указанных кавитационных течений с учетом экспериментальных данных, получаемых на научно-учебном гидродинамическом стенде. Установлено, что в развитом релаксационном режиме колебаний максимальный размах пульсаций давления имеет значение, соизмеримое с вычисленным по формуле (3). Результаты исследований показали, что колебания, создаваемые в трубопроводе с ограниченной искусственной газовой каверной, имеют широкий спектр практических применений в технологических процессах различных производств [44—46], а также при динамических и ресурсных испытаниях гидросистем.

В связи с развитием вычислительной техники и внедрением численных методов, особенно в последнее время, появилась возможность прямого интегрирования системы уравнений Навье — Стокса в задачах гидродинамики при учете реальных свойств рабочей жидкости. Аспирантом кафедры С.В. Лебедевым решена задача течения пищевых масс со сложной реологией в шнековых устройствах. Аспирантом Е.П. Петровым численно методом Галеркина в сочетании с методом конечного элемента решена задача о движении вязкой несжимаемой жидкости в трубопроводе при наличии стабилизатора давления в виде шайбы [47]. При интегрировании дифференциальных уравнений Навье — Стокса преодолена неустойчивость численного расчета. Полученные результаты расчетов в виде картины поля скоростей представлены на рис. 8.

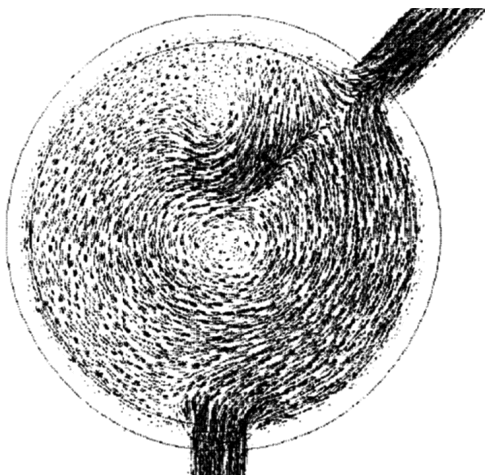


Рис. 8. Картина поля скоростей потока в демпфере в виде плоской шайбы и в подводящих трубопроводах

Важными аспектами решения задач динамики гидромеханических систем являются не только вопросы их математического моделирования, но также и их оптимизации и диагностирования на основе методов глобальной оптимизации. В.Д. Сулимовым с соавторами разработан ряд гибридных методов глобальной оптимизации, созданы комплексы программ для решения такого типа задач на ЭВМ и предложены методики эффективного решения обратных спектральных задач применительно к широкому кругу гидромеханических систем и процессов [48—51].

Одной из главных составляющих деятельности кафедры является создание учебников и методических пособий по всем представленным на кафедре направлениям научной и учебной работы, в том числе и по вопросам динамики гидромеханических систем. Так, движение сплошной среды описано профессором Н.Н. Никитиным в базовом учебнике по теоретической механике [52]. Общие и специальные вопросы теории колебаний, которые имеют широкое применение в динамике гидромеханических систем, изложены в учебнике [53], написанном М.М. Ильиным, К.С. Колесниковым и Ю.С. Саратовым. Основным учебником для ряда специальностей, связанных с расчетом и проектированием жидкостных ракет, является монография академика К.С. Колесникова [54]. Вопросам динамики пневмогидросистем посвящена книга [55], одним из соавторов которой является доцент Ю.М. Степанчук. Профессор А.Н. Пастухов на протяжении многих лет читал факультативный курс «Нелинейная вихревая теория обтекания тел в механике сплошной среды», основные положения которого изложены в серии методических пособий [56]. Вопросам конструирования и расчета гидро- и электрогидравлических вибрационных механизмов посвящена монография профессора В.Н. Баранова [57]. В задачнике по курсу теоретической механики [58], созданном коллективом преподавателей кафедры под редакцией К.С. Колесникова, представлено несколько разделов, относящихся к практическому применению знаний по теоретической механике для расчета специальных задач по динамике гидромеханических систем.

Николай Егорович Жуковский придавал исключительно важное значение вовлечению студентов в научную и инженерно-конструкторскую работу. Недаром студенческое научно-техническое общество (СНТО) МГТУ им. Н.Э. Баумана носит имя Н.Е. Жуковского. Для того чтобы это важное направление работы развивалось, на кафедре ежегодно проводятся конференции СНТО, на которых студенты выступают с научными сообщениями, подготовленными под руководством ведущих преподавателей. Так, на кафедральной студенческой научной конференции 2012 г., посвященной 165-летию со дня рождения Н.Е. Жуковского, по динамике гидромеханических систем было сделано более десяти докладов студентов и аспирантов. Выполненные под руководством профессора А.А. Пожалостина доклады студентов А.А. Барина и С.А. Демидова опубликованы в

Студенческом научном вестнике, а результаты работы аспиранта Д.А. Гончарова — в виде статьи в научном журнале. Под руководством профессора П.М. Шкапова студенты С.А. Дорошенко и И.В. Кытманов, участвовавшие в создании научно-учебного гидродинамического стенда для исследования динамики кавитационных течений, провели на нем первые экспериментальные исследования, результаты которых были представлены на Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» и опубликованы в сборнике трудов ММТТ-25.

В настоящей статье дан лишь краткий обзор публикаций сотрудников кафедры по динамике гидромеханических систем в ведущих рецензируемых научных журналах, монографиях и учебных пособиях. Персонально упомянуты также не все штатные сотрудники, совместители и аспиранты, принимавшие участие в исследованиях по данному и смежным направлениям научно-учебной работы кафедры. Значительная часть результатов исследований содержится в научно-технических отчетах, в том числе совместных с другими научными коллективами, которые выполнены по заданиям министерств, научно-производственных объединений и предприятий. Многие результаты внедрены в конкретные изделия, разработки в различных областях техники и получили признание научной общественности в нашей стране и за рубежом, а их авторы отмечены научными премиями и наградами. Сотрудники кафедры активно участвуют в международных, всероссийских и отраслевых научных конференциях, симпозиумах и съездах.

Традиции, заложенные Н.Е. Жуковским, основателем кафедры теоретической механики ИМГУ — МГТУ им. Н.Э. Баумана, продолжают развиваться, в том числе в области динамики гидромеханических систем. В состав исследователей по данному направлению вливаются новые сотрудники кафедры, аспиранты и студенты, что служит залогом его дальнейшего успешного развития.

В последнее время исследования проводились при поддержке Министерства образования и науки РФ в виде грантов Президента РФ для ведущих научных школ НШ-1816.2003.8, НШ-6108.2006.8, № НШ-1311.2008.8, НШ-5271.2010.8, НШ-4748.2012.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуковский Н. Е. Избранные труды: в 9 т. М.: Гостехиздат, 1937.
2. Космодемьянский А. А. Николай Егорович Жуковский. М.: Наука, 1984.
3. Колесников К. С. Об особенностях свойств одной маятниковой системы // ПММ. Изд-во АН СССР. 1962. № 4. С. 2618—2624.
4. Колесников К. С. Колебания жидкости в цилиндрическом сосуде: метод пособие по курсу «Динамика изделий». М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1964.
5. Пожалостин А. А. Определение параметров механического аналога для осесимметричных колебаний упругого цилиндрического сосуда с жидкостью // Изв. АН СССР. МТТ. 1966. № 5. С. 157—159.

6. Колесников К.С., Самодаев В.Е. Колебания жидкости в цилиндрическом баке с радиальными перегородками // Изв. АН СССР. МЖГ. 1967. № 4. С. 73—78.
7. Самодаев В.Е. О замене упругого сосуда с жидкостью системой масс на пружинах при нахождении динамических реакций опор по известному потенциалу скоростей // Изв. вузов. Авиационная техника. 1968. № 2. С. 12—20.
8. Колесников К.С. Жидкостная ракета как объект регулирования. М.: Машиностроение, 1969.
9. Колесников К.С. Продольные колебания ракеты с жидкостным ракетным двигателем. М.: Машиностроение, 1971.
10. Пожалостин А.А. Свободные колебания жидкости в жестком цилиндрическом сосуде с упругим дном в виде пологой сферической оболочки // Изв. вузов. Авиационная техника. 1967. № 2. С. 21—26.
11. Пожалостин А.А. Построение системы гармонических функций для расчета осесимметричных колебаний жидкости в упругом цилиндрическом баке со сферическим днищем // Изв. АН СССР. МТТ. 1972. № 1. С. 71—74.
12. Pozhalostin. A. A. Determination of a function transfer hidroulic dampfer system of a feed rocket liquid engine // J. Soviet Aeronautics. 1977. No. 3. P. 31—34.
13. Пожалостин А.А. Продольно-поперечные колебания упругого стержня с жидкостью // Изв. вузов. Авиационная техника. 1995. № 1. С. 76—79.
14. Пожалостин А.А. Динамическая модель гидроаккумуляторного демпфера // Полет. 2007. № 10. С. 17—19.
15. Темнов А.Н. Однородное вихревое движение неоднородной жидкости // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1979. № 293. С. 50—57.
16. Темнов А.Н. Уравнения движения твердого тела с неоднородной жидкостью, совершающей квазипотенциальное движение // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1985. Вып. 402. С. 25—32.
17. Темнов А.Н., Копачевский Н.Д. Колебания стратифицированной жидкости в бассейне произвольной формы // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1986. Т. 24. № 5. С. 734—755.
18. Темнов А.Н. Гевлич А.Л. Свободные колебания и вынужденные движения гравитирующего вязкого ядра Земли под действием Луны и Солнца // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2008. № 4. С. 16—37.
19. Брусенцова Е.А., Плешаков Ю.Д. Новые интегрируемые случаи в задаче Жуковского — Пуанкаре // ДАН СССР. 2008. Т. 418. № 4. С. 473—476.
20. Нестеров С.В., Секерж-Зенькович С.Я. Неустойчивость границы раздела потоков при флуктуациях их относительной скорости // Изв. РАН. ФАО. 1979. Т. 15. № 9. С. 947—952.
21. Нестеров С.В., Секерж-Зенькович С.Я. Об устойчивости границы раздела быстро осциллирующих потоков // Изв. РАН. ФАО. 1980. Т. 16. № 11. С. 1212—1214.
22. Секерж-Зенькович С.Я. Параметрическое возбуждение волн конечной амплитуды на границе раздела двух жидкостей разных плотностей // ДАН СССР. 1983. Т. 272. № 5. С. 1083—1086.
23. Калиниченко В.А. Лабораторное исследование параметрической неустойчивости в двухслойной жидкости // Изв. АН СССР. ФАО. 1986. № 2. С. 206—210.
24. Калиниченко В.А., Секерж-Зенькович С.Я. Экспериментальное исследование вторичных стационарных течений в поверхностных волнах Фарадея // Изв. РАН. МЖГ. 2008. № 1. С. 141—148.
25. Калиниченко В.А., Секерж-Зенькович С.Я. О срыве параметрических колебаний жидкости // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 1. С. 128—136.

26. Колесников К.С., Рыбак С.А., Самойлов Е.А. Динамика топливных систем ЖРД. М.: Машиностроение, 1975.
27. Колесников К.С., Джикаев Б.Л. Нестационарные процессы в простом трубопроводе при быстром срабатывании отсечных устройств // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1975. № 1. С. 174—176.
28. Кинелев В.Г., Бондаренко Н.И., Шкапов П.М. Переходные процессы в сложных трубопроводных системах // Межвузовский сборник научных трудов «Нефтепромысловая и нефтезаводская механика». Грозный: ГНИ, 1987. С. 50—59.
29. Колесников К.С. Вынужденные колебания потока идеальной сжимаемой жидкости в однородной прямой трубе // Изв. АН СССР, ОТН. Механика и машиностроение. 1963. № 4. С. 43—51.
30. Колесников К.С. Вынужденные колебания впрыска идеальной сжимаемой жидкости в камеру // Изв. АН СССР, ОТН. Механика и машиностроение. 1963. № 5. С. 12—23.
31. Колесников К.С. Низкочастотная неустойчивость номинального режима жидкостного ракетного двигателя // Прикладная механика и техническая физика. 1965. № 2. С. 17—34.
32. Колесников К.С., Кинелев В.Г. Колебания жидкости в топливной магистрали, обусловленные пульсациями отрывных зон в шнековом преднасосе // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1976. № 6. С. 155—164.
33. Кинелев В.Г. О влиянии колебаний жидкости в топливной магистрали на напор насоса, работающего на режимах без обратных токов // Изв. вузов. Авиационная техника. 1977. № 3. С. 52—57.
34. Кинелев В.Г., Солохин Е.Н. Кинематические особенности течения жидкости на входе в насос и образование паровой фазы // Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1979. № 306. С. 72—79.
35. Кинелев В.Г. О нестационарной составляющей напора кавитирующего насоса // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1979. № 1. С. 156—164.
36. Кинелев В.Г. Кавитация в осевых насосах // Изв. РАН. Энергетика. 1993. № 3. С. 146—156.
37. Колесников К.С., Степанчук Ю.М. Об устойчивости работы системы регулирования давления наддува баков // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1978. № 5. С. 136—143.
38. Кинелев В.Г., Шкапов П.М. О влиянии наличия в жидкости свободных газовых включений на динамические характеристики топливной магистрали // Изв. вузов. Авиационная техника. 1980. № 3. С. 112—115.
39. Кинелев В.Г., Шкапов П.М. Об одной особенности динамики топливной магистрали, заполненной двухфазной средой // Изв. вузов. Машиностроение. 1981. № 3. С. 53—56.
40. Колесников К.С., Кинелев В.Г., Шкапов П.М. Колебания двухфазного потока в трубопроводе // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1982. № 4. С. 167—171.
41. Шкапов П.М. Устойчивость системы трубопровод — нагрузочный агрегат с учетом неоднородности свойств потока // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. Т.16. № 4. С. 873—878.
42. Кинелев В.Г., Шкапов П.М. Динамика ограниченной газовой каверны в трубопроводе // Инженерно-физический журнал. 1991. № 3. С. 578—585.
43. Кинелев В.Г., Шкапов П.М. Устойчивость и колебания жидкости в трубопроводе с ограниченной газовой каверной в потоке // Теоретические основы химической технологии. 1997. № 4. С. 341—345.
44. Шкапов П.М. Создание пульсаций потока жидкости на основе автоколебаний ограниченной искусственной газовой каверны // Хранение и переработка сельхозсырья. 2010. № 9. С. 55—58.

45. Шкапов П.М., Благовещенская М.М. Теоретические и экспериментальные вопросы динамики течений жидкости с ограниченной искусственной газовой каверной // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (3). С. 1275—1277.
46. Гартиг Е.Б., Благовещенский И.Г. Прикладные задачи динамики течения жидкости в трубопроводе с ограниченной искусственной газовой каверной // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. Т. 4 (3). С. 705—707.
47. Pozhalostin A.A, Petrov E.P. Analytical method of calculating the transfer function of damper in pipe. // J.: Vibration and Acoustiks, American Society of Mechanical Engineers, Paper No. VIB-08-1195 December 2008.
48. Кинелев В.Г., Сулимов В.Д., Шкапов П.М. Диагностирование гидросистемы на основе анализа изменений ее частотного спектра // Изв. РАН. Энергетика. 1998. № 6. С. 112—119.
49. Кинелев В.Г., Сулимов В.Д., Шкапов П.М. Применение глобальной оптимизации для диагностирования реакторов ВВЭР-1000 // Progress in Nuclear Energy. 2003. Vol. 43. No. 1—4. P. 51—56.
50. Сулимов В.Д., Шкапов П.М. Сглаживающая аппроксимация в задачах векторной недифференцируемой оптимизации механических и гидромеханических систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2006. № 2. С. 17—30.
51. Sulimov V.D., Shkapov P.M. Hybrid algorithms for multiobjective optimization of mechanical and hydromechanical systems // Journal of Mechanics Engineering and Automation. 2012. Vol. 2. No. 3. P. 190—196.
52. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики: учеб. для вузов. 5-е изд. М.: Высш. шк., 1990.
53. Ильин М.М., Колесников К.С., Саратов Ю.С. Теория колебаний: учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2003. (Сер. «Механика в техническом университете».)
54. Колесников К.С. Динамика ракет: учеб. для вузов. 1-е изд. М.: Машиностроение, 1988; 2-е изд. М.: Машиностроение, 2003.
55. Пневмогидравлические системы. Расчет и проектирование: учеб. пособие для вузов / Н.М. Беляев, Е. И. Уваров, Ю. М. Степанчук. М.: Высш. шк., 1988.
56. Пастухов А.Н. Вихревое математическое моделирование обтекания тел потоком сплошной среды: учеб. пособие. Вып. 1—3. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993—1995.
57. Баранов В.Н., Захаров Ю.Е. Электрогидравлические и гидравлические вибрационные механизмы (теория, расчет и конструкции). 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977.
58. Задачник по теоретической механике: учеб. пособие для вузов / Под ред. К.С. Колесникова. 1-е изд. М.: Высш. шк., 1978; 5-е изд. М.: Лань, 2010.

Статья поступила в редакцию 14.09.2012