

УДК 532.528

## ПЯТЬДЕСЯТ ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ СУПЕРКАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ В США: ЛИЧНЫЕ ВОСПОМИНАНИЯ

М. П. Т У Л И Н\*

\* Калифорнийский университет, Санга-Барбара, США

Получено 15.06.2000

Изложена история развития исследований по суперкавитации в Соединенных Штатах Америки в форме личных воспоминаний автора. Обзор охватывает 50-летний период от создания линеаризованной теории суперкавитационных течений до появления проектов высокоскоростного транспорта 21-го столетия. Помимо хронологии исследований автором описываются технические задачи судостроительной промышленности и авиации, стимулировавшие развитие исследований по суперкавитации. Указываются названия предприятий и имена исследователей, принимавших участие в развитии исследований и создании новой техники – суперкавитирующих подводных крыльев и винтов. В статье имеются также ссылки на зарубежные работы по суперкавитации, в том числе выполненные в Германии и СССР и оказавшие важное влияние на развитие исследований по суперкавитации в США.

Викладена історія розвитку досліджень по суперкавітації в Сполучених Штатах Америки у формі особистих згадок автора. Огляд охоплює 50-річний період від створення линеаризованої теорії суперкавітаційних течій до появи проектів високошвидкісного транспорту 21-го сторіччя. Окрім хронології досліджень автором описуються технічні задачі суднобудівної промисловості та авіації, які стимулювали розвиток досліджень суперкавітації. Вказуються назви установ та імена дослідників, які брали участь в розвитку досліджень і створенні нової техніки – суперкавітуючих підводних крил та гвинтів. В статті є також посилання на закордонні роботи по суперкавітації, в тому числі, які виконані в Німеччині та СРСР і мали важливий вплив на розвиток досліджень суперкавітації в США.

History of development of researches on supercavitation in United States of America is stated in the article in the form of personal recollections. The review embraces fifty years period from creation of the linearized theory of supercavitating flows to appearance of designs of high-speed vehicles of 21st century. Besides the research chronology, technical problems of shipbuilding industry and aviation, which stimulated the development of researches on the supercavitation, are described by author. References of foreign works on supercavitation including works fulfilled in the Germany and USSR and exerted important influence on the development of investigations on the supercavitation in the USA are contained in this article.

### ВВЕДЕНИЕ

Эти воспоминания собраны с надеждой, что они могут быть особенно интересны новому поколению исследователей высокоскоростной гидродинамики. Я подчеркнул бы, что это – не обзор в традиционном смысле, так как он сосредоточен на работе, в которую я лично был вовлечен. Много важных работ по суперкавитации, которые не упомянуты здесь, были выполнены различными исследователями как в США, так и в других странах.

В 1952 году как молодой ученый-исследователь при испытательном бассейне Дэвида Тейлора я имел удовольствие сопровождать молодого, но уже известного посетителя в осмотре наших экспериментальных установок. Это был Пол Гарабедян, профессор математики Стенфордского университета. Он заинтересовался гидродинамической теорией течений со свободными линиями тока частично под влиянием работ математиков Макса Шиффера (Гарвардский университет), Дэвида Гилбарга (Стенфордский университет), Джо Вейла (Организация морских исследований) и физика Милтона Плессета (Калифорнийский техноло-

гический институт). Позже я понял, что интерес к гидродинамике и, особенно, к течениям со свободными линиями тока этих очень компетентных математиков и ученых в США был вызван настоящими практическими проблемами военного времени (второй Мировой войны). Среди них, например, проблемы входа в воду торпед как в стадии ударного воздействия, так и во время последующего движения были причиной кризиса в военно-морской авиации; вентилируемые каверны стали образовываться на торпедах и резко изменять их курс, иногда вызывая рикошет. Значительный интерес вызывало само математическое обоснование течений со свободными линиями тока, начатое в работах Гельмгольца и Кирхгоффа, где выявилась его связь с теорией аналитических функций, и продолженном затем в работах многих европейских математиков.

В то время я проводил и организовывал исследования по сопротивлению судов и турбулентным течениям в испытательном бассейне Дэвида Тейлора (ИБДТ), а перед этим работал несколько лет при 8-ми футовой высокоскоростной гидротрубе в Лаборатории Ленгли НАСА после изучения в МИТ аэронавтики и прикладной математики. В резуль-

тате я знал очень немного о кавитационных течениях или кавитации. Гарабедян рекомендовал мне тогда недавно вышедшую и хорошо написанную книгу Гаррета Биркгоффа "Гидродинамика", основанную в значительной части на собственных работах, написанных во время войны, и работах других авторов [1]. Она дала мне превосходное и захватывающее представление о кавитационных течениях.

## ЛИНЕАРИЗОВАННАЯ ТЕОРИЯ ТОНКОГО ТЕЛА

Я был особенно поражен невозможностью существования замкнутых стационарных каверн, которые требовали изобретения оригинальных искусственных моделей, например симметричной модели Рябушинского и модели возвратной струи, независимо изобретенных Гилбаргом (США), Эфросом (СССР) и Крейзелем (Великобритания) во время войны. Я почти сразу понял, что для малых чисел кавитации длинная каверна была тонкой в том смысле, что диаметр был намного меньшим, чем длина. Этот режим кавитационного обтекания мог бы хорошо быть описан с помощью линеаризирующих концепций, которые применялись успешно к расчетам крыльев, которые также были тонкими.

Я приступил к расчетам кавитационного обтекания тонкого симметричного тела (плоская задача) при произвольном числе кавитации и обнаружил, что единственное решение следовало из условия гладкости течения при соединении свободного тела и движущейся каверны в сочетании с требованием, что полное тело, состоящее из головной части и движущейся каверны, должно быть замкнутым (условие "замкнутости"). Эта теория позволяла вычислять сопротивление на головной части в терминах очень простых квадратур, учитывающих форму головной части.

Математическое обоснование, исключая линеаризацию, которую я делал простым, но правильным способом, популярным в аэродинамике в те дни, включало инверсию сингулярных интегральных уравнений типа Коши, ранее используемых Геттингенской школой Прандтля. Это было началом линеаризованной теории кавитационного обтекания, которая должна была, в конечном счете, стать широко и успешно применимой. Представляется довольно замечательным то, что не нужно было определять модель искусственной каверны вдобавок к прямому условию замыкания. Однако действительное понимание значения этого резуль-

тата пришло ко мне со временем.

## ЭФФЕКТИВНЫЕ СУПЕРКАВИТИРУЮЩИЕ НЕСУЩИЕ КРЫЛЬЯ

Ввиду того, что в военное время движению торпед придавалось особое значение, неудивительно, что меня часто спрашивали после появления моих публикаций в 1953 [2], где и когда я мог бы применить линейную теорию к осесимметричным кавитационным течениям.

Я знал, что в этом случае сильная радиальная особенность затрудняет последовательную линеаризацию соотношения для давления на теле, и поэтому исключает применение правильной и общей теории тонкого тела. Кроме того, оказалось, что особенно полезным применение кавитационных течений могло бы быть для винтовых движителей и, возможно, крыльев, так что я предпочел рассматривать несущие крылья в двумерной постановке и скоро создал теорию крыла произвольной формы при нулевом числе кавитации [3]. В этой работе я впервые использовал теорию аналитических функции и конформных отображений и получил результаты для подъемной силы и сопротивления кавитирующего крыла, выраженные через момент и подъемную силу на "эквивалентном" крыле. Таким образом можно было продемонстрировать, что эффективные кавитирующие крылья требуют максимального выдвигания центра давления при поддержании зазора между вершиной крыла и каверной над ним. Этот принцип применялся для получения того, что было позже названо суперкавитирующим крылом по второй схеме Тулина.

Сразу стало очевидно, что соотношения для подъемной силы и сопротивления для этих оптимизированных крыльев были достаточно громоздкими, чтобы позволить разрабатывать эффективные кавитирующие движители.

Приблизительно в это же время я впервые узнал о работе советского ученого Поздюнина о кавитирующих движителях и также о русском термине "суперкавитация", и впредь я начал использовать этот способ различения кавитационных течений с длинными сбегающими кавернами от других кавитационных течений. Вначале были возражения по использованию этого слова, некоторые предпочитали "развитая кавитация", но скоро слова "суперкавитация" и "суперкавитирующий" вошли в общее использование в США и во всем мире.

Важным результатом, ранее полученным в [2], был асимптотический закон для длины плоской ка-

верны:

$$l/T \simeq \frac{8 C_D}{\pi \sigma^2}. \quad (1)$$

В последующей работе [4], отделяя симметричную и несимметричную (относительно вертикальной оси) части задачи, я смог показать, что уравнение (1) также подходит для тонких тел с подъемной силой.

В это время очень мало было известно о влиянии числа кавитации на подъемную силу, кроме некоторых экспериментальных данных Уолчера на плоских сечениях подводной части корабля, а я смог уже в 1952 году, пользуясь подходящим конформным отображением и проведя численные расчеты, получить в этом случае аналитическое решение. Я обнаружил, что для малых  $\sigma$

$$C_L = C_L(o)(1 + \sigma);$$

при том, что Уолчер предложил

$$C_L = C_L(o) + \sigma.$$

Это несоответствие причиняло мне большое беспокойство, но последующие эксперименты подтвердили мои результаты, к тому же мои собственные вычисления также показали, что подъемная сила быстро увеличивается по мере увеличения  $\sigma$ .

### НАШ ПЕРВЫЙ СУПЕРКАВИТИРУЮЩИЙ ДВИЖИТЕЛЬ

В ИБДТ было решено спроектировать винтовой движитель, использующий профили лопастей по второй схеме Тулина, и определить его характеристики, если будет подтверждена его высокая эффективность. Это был смелый шаг, поскольку гидродинамический коэффициент ( $C_L, C_D$ ) этих суперкавитирующих профилей с низким сопротивлением в гидротрубе еще не измерялся, так что в готовом проекте определения как тяги, так и вращательного момента основывались на теоретических оценках [3]. Слабо нагруженный двуллопастный винт был спроектирован и испытан с большим успехом Алексом Тачминджи и Биллом Морганом из отдела движителей при ИБДТ. Достигнутая им тяга соответствовала проектной с высокой точностью, необходимой в этом случае. Это стало началом исследования и применения суперкавитирующих движителей в США, которые были продолжены с энтузиазмом в ИБДТ и позже в корпорации гидронавтики. Этот успех был широко разрекламирован.

### СТРЕМИТЕЛЬНОЕ ПРОДВИЖЕНИЕ В ПЯТИДЕСЯТЫХ ГОДАХ

Теория осесимметричной каверны уже была создана ранее в 50-ых годах Гарабедяном, который первым предложил асимптотическую теорию осесимметричной каверны дополнительно к закону (1). Закон Гарабедяна [7] имеет вид

$$\left(\frac{l}{d}\right)^2 \sim \left(\frac{Cd}{\sigma^2}\right) \ln\left(\frac{1}{\sigma}\right). \quad (2)$$

Приблизительно с 1955 году исследования суперкавитационного обтекания в США ускорились под влиянием Управления военно-морских исследований (отделение механики), где я работал в 1955-1957 гг. Фундаментальные исследования как теоретические, так и экспериментальные были выполнены учеными Калифорнийского технологического института (Ву, Акостой, Паркиным, Кермином, Хсу, Кисенюком), Университета Штата Миннесота (Зильберманом, Сонгом) и RPI (Кохеном, Ди Примои) и многими другими. Таким образом, наши знания о суперкавитационных течениях быстро развивались. Происходило развитие суперкавитационной теории, включая разработку нелинейных подходов, но при расширении дальнейшего применения линеаризованной теории. Также быстро развивалось ее экспериментальное подтверждение, например, изучение влияния границ (стен гидротруб) и течений с частичной кавитацией.

Суперкавитирующие треугольные крылья. Работая как офицер по научным связям при Организации морских исследований в Лондоне в конце 50-ых, я посетил старую лабораторию Прандтля в Геттингене и разговаривал с Рейхардтом, который проводил экспериментальные (в гидротрубе) и аналитические изучения осесимметричных суперкаверн во время войны, в связи с проектированием высокоскоростных тел в авиации. Один из его студентов производил расчеты суперкавитационных течений за тонкими треугольными крыльями, что вдохновило меня на разработку теории для этих крыльев [9]. Это было в любом случае продолжением моей работы о тонких глассирующих поверхностях при больших числах Фруда [10]. Особенность этого суперкавитационного течения заключается в том, что каверны, которые срываются с двух обтекаемых передних кромок, не охватывают полностью крыло, а схлопываются на нем, и центр крыла остается полностью смоченным.

**Высокоскоростные (дозвуковые) поправки.** Работая ранее в сфере высокоскоростной аэродинамики, я интересовался влиянием сжимаемости на форму каверны, и в 1958 году [9] применил законы подобия Прандтля-Глауэрта к кавернам при дозвуковых скоростях. Я думал, что можно теорию суперкавитационного обтекания применить к отрывным воздушным течениям за тупыми телами, подобными удерживателям пламени в реактивных двигателях [11]. Я, конечно, никогда не представлял, что скорость тел в воде достигнет и превысит скорость звука, как это происходит теперь.

**Гладкий сход каверны.** Продолжая работы по суперкавитационному обтеканию стойки с тупым концом [2], я рассмотрел случай тонкой стойки, когда точка схода каверны не была известна заранее. Здесь условие для гладкого схода (непрерывное искривление линии тока в точке схода) и выпуклая форма являются только достаточными для получения решения в пределах линеаризованной теории. Были рассчитаны точки схода и коэффициенты сопротивления для различных тонких стоек, включая семейство, где толщина описывается полиномами третьей степени. До сих пор пока нет экспериментальных наблюдений, улучшающих понимание этого вопроса.

Разработки 60-ых годов были рассмотрены в [8] с акцентом на представлении полезных результатов. Эта работа остается и сегодня полезной обзорной статьей.

### **СУПЕРКАВИТИРУЮЩИЙ ДВИЖИТЕЛЬ ДЕНИСОНА. НЕРЕШЕННЫЕ ЗАДАЧИ. ТЕОРИЯ СУПЕРКАВИТАЦИОННОГО ИМПУЛЬСА**

Через год после основания корпорации гидронавтики в 1959 году мы получили один из наших первых контрактов от компании, разрабатывающей в то время 60-узловые суда на подводных крыльях значительных размеров для Министерства морского транспорта США, движимые газовой турбиной в 10 000 лошадиных сил. Это повлекло за собой проектирование суперкавитирующего движителя и гондолы движителя.

Главная проблема в этом проекте состояла в том, чтобы развить большую тягу, требующуюся при 30 - 35 узлах, когда судно переходит от

корпусного поддержания к крыльевому. В процессе проектирования и испытания нескольких вариантов мы должны были выявить причину серьезной потери тяги и преодолеть ее. Это происходит на суперкавитирующих движителях на нерасчетных режимах с низкой поступью (относительно высокая вращательная скорость). Мы определили причину этого затруднения для очень больших каверн, образующихся в этих условиях, которое имело два очень вредных последствия: (1) приток к движителю стал замедленным (блокированным) и (2) каверна от предшествующей лопасти подходила ближе и ближе к следующей лопасти, которая оказывалась в условиях, как если бы работала вблизи к свободной поверхности, снижая эффективность. Я обязан моему коллеге Вирджилиу Джонсону за то, что он указал мне на этот эффект, и более старой немецкой литературе по характеристикам решеток в течениях со свободными линиями тока.

Лодка на подводных крыльях, называемая лодкой Денисона, успешно стартовала и летала при 60 узлах приблизительно в 1962 году, имея двуллопастный движитель малой прочности со вполне достаточным изгибом и используя большое основание, которое мы ввели для компенсации изгибающей силы. Эти профили использовались сначала на движителях, имели параболическую толщину, введенную для повышения силы прочности и для утолщения верхней каверны.

Эффект блокировки наблюдался Поздониным, и несколько небольших российских статей (одна из них – Эпштейна) были посвящены его теоретическому описанию, но только когда каверна за движителем была бесконечно длинная. Фактически мы обнаружили, что полная каверна за движителем была порядка диаметра движителя, то есть относительно короткой (кроме случая, когда влияние стенок гидротрубы позволяло ей простираться вдоль всей трубы). Поэтому я взялся развивать импульсную теорию суперкавитации для общего случая [13]. Проблема вычисления полной формы каверны за движителем была предпринята моим коллегой, Родом Барром, и рассмотрена кратко в [14]. Только после завершения этих работ я почувствовал, что достиг достаточного понимания действия суперкавитирующего движителя. Краткий обзор гидродинамики и работы суперкавитирующего движителя представлен в [15].

## СУПЕРКАВИТИРУЮЩИЕ КРЫЛЬЯ И СУДА НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

Приблизительно в 1960 году Бюро судов американского флота приняло программу разработки судна на подводных крыльях, включая программу исследования суперкавитационных или вентилируемых крыльев для высокоскоростного движения, в значительной степени выполненную в корпорации гидронавтики. Изучение высокоскоростных крыльев уже проводилось в начале 50-ых годов в Отделении гидросамолетов НАСА под руководством Джека Паркинсона. Он ранее начал изучение механизма приведения таких крыльев для гидросамолетов, но проектирование и испытания вентилируемых стоек и крыльев проводил Вирджил Джонсон, который позже присоединился к нам в корпорации гидронавтики. Значительными достижениями были испытания при скоростях более чем 100 футов/с прямоугольного крыла малого сопротивления и вентилируемых стоек, подающих воздух к крылу, и расширение семейства суперкавитирующих подводных крыльев с малым сопротивлением до так называемых крыльев Джонсона 3 и 5 [16, 17].

Для экспериментального изучения в условиях кавитации и/или вентиляции мы (Алекс Гудман, Джонсон и, непосредственно, я) разработали и построили в корпорации гидронавтики специальную гидротрубу со свободной поверхностью с регулируемым давлением, глубиной воды, специальным коротким диффузором и вентилируемым резервуаром (см. [18], стр. 75). Это было превосходное место для моделирования высокоскоростных течений со свободной поверхностью и для испытания высокоскоростных движителей. В последнем случае наличие свободной поверхности предотвращало блокировку трубы, которая является серьезной проблемой для испытания суперкавитирующих движителей в трубах, окруженных твердой стенкой. Действующая копия этой трубы находится в Bassin des Essais Carennes в Val Reuil во Франции. Испытательная часть и оснащение движителя были предоставлены корпорацией гидронавтики согласно проекту Гудмана.

Множество индивидуальных и всесторонних исследований, касающихся суперкавитирующих подводных крыльев, было проведено персоналом корпорации гидронавтики в 60-ых годах. Они слишком обширны, чтобы их можно было рассмотреть здесь.

Также там был реализован ряд актуальных проектов высокоскоростных судов с подводными кры-

льями, которые были очень полезны для понимания некоторых серьезных проблем, возникающих в реальных условиях. Они включают задачи снижения сопротивления непосредственно после взлета, перехода с докавитационного к суперкавитационному режиму, структурные проблемы, являющиеся результатом очень больших перегрузок при высоких скоростях в воде, и необходимости справиться с быстро изменяющейся орбитальной скоростью частиц воды при морском волнении. Вирджил Джонсон применил необычный подход к проектированию 90-узловых салазок вертолета, где он представил решение вышеупомянутой задачи в виде системы, пересекающей свободную поверхность, состоящей из трех отдельных систем профилей, смонтированных на вентилированной стойке один под другим со слабокавитирующим крылом большой площади на вершине, суперкавитирующим крылом у основания, с вентилируемым профилем между ними. Схема сборки этого крыла показана в [15]. В каждом углу салазок было установлено по одной такой конструкции. Это транспортное средство успешно испытано в масштабных условиях в гидротрубе со свободной поверхностью в корпорации гидронавтики, но так и не было построено.

Исследование другого амбициозного проекта высокоскоростных судов с суперкавитирующими крыльями проведено для французской аэрокосмической компании. При этом были применены наши наиболее продвинутые технологии по крыльям, стойкам и проектированию движителей, включая учет сопротивления материалов, и использованы закрылки и интерцепторы для управления подъемной силой при движении судна. Схема сборки этого крыла показана в [16]. Но этот проект также никогда не был претворен в жизнь. Мы обнаружили, что гидродинамическое качество (отношение подъемная сила/сопротивление) подводного крыла снижалось со скоростью вследствие учета сопротивления материала, что ограничивало удлинение и требовало увеличения толщины крыла при возрастании скорости. Оценки качества реального подводного крыла (с двумя стойками) даны в [17] и падают ниже 10 (подъемная сила/сопротивление) в суперкавитационных режимах.

Интерес к возможностям высокоскоростного суперкавитирующего судна на подводных крыльях упал в 60-ые годы с появлением аппарата на воздушной подушке и систем поддержания воздушных завес. Значительная опытная работа была проведена на 70-80-узловой системе воздушных завес по двум методикам. Первая использовала струю воды, вторая – полупогруженный суперка-

витирующий винт. Исследование движителей проводилось в корпорации гидроавтики. Кажется, сегодня там опять возрождается интерес к суперкавитирующим крыльям с применением несущей поверхности большого размаха с множеством стоек. Этот факт служит проявлением общего интереса к высокоскоростным (70 узлов и выше) судам для трансокеанского грузового транспорта. В [18] дан обзор ситуации и обсуждены перспективы.

## ПУЛЬСАЦИИ КАВЕРНЫ

Мы заинтересовались фундаментальными аспектами автопульсаций вентилируемых каверн, обнаруженных Зильберманом и Сонгом из Штата Миннесота (1959). Мои коллеги, Хсу и Чен, провели подробный теоретический анализ этого явления в двумерной постановке [25] в том же самом году. Решение для несжимаемой внутренней части согласовывалось с решением для сжимаемого внешнего потока, в то время как взаимодействие между сжатием газа в каверне и внешним потоком рассматривалось в пределах линеаризованной теории. Эта статья была отклонена JFM на том основании, что двумерные неограниченные потоки "нереалистичны". Тогда считалось, что для формирования автопульсаций необходимы ограничивающие поверхности или трехмерность. Фактически, Хсу впоследствии показал [26], что теоретические расчеты Хсу и Чена дают хорошее согласование с экспериментами Зильбермана и Сонга. Важный вклад в эту теорию был сделан Мишелем (Гренобль, Франция) в 70-ых годах. Кстати, в работе [20] предлагается очень хороший источник полезных результатов по суперкавитирующим профилям и крыльям, устойчивым и неустойчивым, со множеством ссылок.

## РАЗВИТАЯ АСИМПТОТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ; МОДЕЛИ СПИРАЛЬНЫХ ВИХРЕЙ

Оказалось очень полезным при проектировании применять асимптотическую теорию второго порядка для возможного корректирования подъемной силы и сопротивления для нелинейных эффектов. Эти разработки описаны в [5] наряду с различными математическими обоснованиями теории суперкавитационного обтекания с использованием сложных обозначений, а также плоскости потенциала и функции тока ( $\phi, \psi$ ) вместо физической плоскости ( $x, y$ ). Эти расчеты выполнены в 1962-1963 гг. непосредственно при подготов-

ке статьи, которую мне предложили представить на специальном симпозиуме IUTAM. Она называлась "Применение теории аналитических функций в механике". Симпозиум проходил в Тбилиси (СССР) в 1963 году по случаю семидесятилетнего юбилея Мухилишвили. Тот же подход привел меня очень естественно в этой статье к двум новым моделям замыкания каверн, включающим спиральные вихри – модели с одним и двумя вихрями. Они оказались очень полезными на практике и были позже приняты многими другими исследователями. Во время этого моего первого посещения СССР я имел удовольствие встретиться со многими советскими гидродинамиками, которых я знал только по именам: Седовым, Гуревичем, Баренблаттом, Стретинским, Лойцяным, Эпштейном. Я также организовал поездку на внушительном пассажирском теплоходе с подводными крыльями по реке Неве в Санкт-Петербурге, который использовал вентиляцию крыльев для управления глубиной.

После встречи в 1963 году в Тбилиси Гуревич по поручению Седова организовал семинар в Москве по моим суперкавитационным работам. После этого последовало широкое распространение применения линеаризованной теории к задачам суперкавитационного обтекания. Их результаты опубликованы во множестве книг, изданных в то время.

Впоследствии, в 1964 году я расширил модель спиральных вихрей, включив учет воздействия импульса вязкого следа позади области схлопывания каверны [6] и это позволило впервые удовлетворительно моделировать кавитационные течения при  $C_D \sim O(1)$  и  $C_D \sim O(\text{тонкость})^2$ . Ясно было с самого начала, что две модели спиральных вихрей предполагают два экстремума восстановления давления при схлопывании каверны: полное восстановление для модели с двумя вихрями и никакого восстановления для модели с одним спиральным вихрем. При практическом применении мы решили проблему полного восстановления для случая частичной (носовой) кавитации и, в некоторой степени, для течения между двумя суперкавитационными потоками. Учет воздействия следа иногда оказывается весьма важным.

## ЧАСТИЧНЫЕ КАВЕРНЫ

В 1974 году ко мне обратились ученые из фирмы Дет Норске Веритас относительно задачи частичной (носовой) кавитации на лопастях движителя и, таким образом, я заинтересовался этой пробле-

мой, где применение традиционной линеаризованной теории ранее имело расхождение по полученным результатам с экспериментами. Я получил решение для случая, когда предполагалось, что носовая каверна являлась возмущением безотрывного обтекания крыла. Эта теория оказалась чрезвычайно успешной для прогнозирования экспериментальных результатов [27].

## ОПИСАНИЕ БЕСКАВИТАЦИОННЫХ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Теория свободных линий тока возникла с попыток Гельмгольца и Киркгоффа моделировать течения возле плохообтекаемых тел и таким образом учитывать наличие сопротивления. По некоторым причинам эти попытки потерпели неудачу. Тем временем задача расчета коэффициента давления и длины следа за плохообтекаемыми телами с установившимися следами осталась нерешенной. В [27] мы срачивали внешнее кавитационное течение с простыми вязкими решениями во внутреннем течении и полученные решения очень хорошо согласовывались с экспериментами для двух случаев: обтекания вертикальной плоской пластины с установившимся следом и обтекание очень тонкой двумерной плоской пластины с носовым отрывом.

## ОБОВЩЕНИЕ АСИМПТОТИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ ДЛЯ ДЛИНЫ КАВЕРНЫ

Несмотря на попытки вычисления суперкавитирующего крыла конечного удлинения в 60-ых годах и позже, общая теория, связывающая длину каверны с сопротивлением на головной части и числом кавитации, была непригодной для общего случая, который имеет место между двумерным уравнением (1) и осесимметричным случаем, рассмотренным Гарабедяном (2). В конце 1996 года я занялся этой задачей с целью внести свой вклад по случаю 65-летия Лин ван Вийнгардена из Нидерландов [19]. Без учета силы тяжести оказалось возможным использовать формулы, включающие полные эллиптические интегралы для формы каверны за эллиптическим крылом для произвольного удлинения, заданного сопротивлением и числа кавитации. Характерные формулы для перехода от квази-плоского и длинно-плоского режима к длинно-плоскому и сфероидальному задавались в виде  $\sigma = f(C_D/AR)$ . Это было сделано с использованием простого метода энергетических потоков, также применимого для случая с учетом силы тя-

жести, которая может иметь решающее влияние на форму каверны.

## СУПЕРКАВИТИРУЮЩИЕ СНАРЯДЫ

Не так давно возник интерес к малым снарядам, движимым по инерции в воде, и я предложил форму суперкавитирующего, стабилизированного вращением снаряда с передним выступом для увеличения кавитационного зазора вокруг него. Это устройство было запатентовано [20].

## СИЛА ТЯЖЕСТИ В СУПЕРКАВИТАЦИОННЫХ ПОТОКАХ

Из результатов работ, выполненных в США и Великобритании в 50-ых годах, было обнаружено, что осесимметричная каверна может генерировать сходящие вихри, сильно искажающие форму каверны (см. [8]), и предположено, что возникновение этого явления зависит от того, будет ли произведение  $(F_d \cdot \sigma)$  меньше (доминирующая сила тяжести) или больше (незначительная сила тяжести), чем 1.0. Режим с учетом силы тяжести интенсивно изучался Эпштейном и рассмотрен с некоторыми подробностями в книге Логвиновича. Я до настоящего времени работаю над теоретическим описанием этого явления.

Влияние силы тяжести на характеристики суперкавитирующего крыла было замечено в экспериментах Иванова, но я применил двумерную теорию и показал, что длина каверны конечна при наличии вертикальной силы тяжести даже для нулевого  $\sigma$ , и что каверна в этом случае имеет почти плоскую вершину (сила тяжести снизу) и отрицательно выпуклую форму каверны. Это создает замыв снизу головной части, интенсивность которого зависит от числа Фруда, зависящего от длины каверны (см. [6]).

При испытаниях вентилируемых поверхностных крыльев в буксировочном канале при Университете Штата Миннесота в 60-ых годах наблюдалось, что поверхностные волны, вызванные этими крыльями, были намного меньше, чем очень большие каверны, тянущиеся позади этих крыльев. Объяснение этого наблюдения содержится в очень важных результатах теории течений со свободными границами без волн [21,22]. В [21] я показал, что каверна в вертикальном поле воздействия силы тяжести, созданная телом, движущимся горизонтально под свободной поверхностью, не вызывает гравитационные волны. Любые суще-

ствуючі волни викликані тільки за рахунок головної частини. Цей результат справедливий для всіх каверн, як для плоских, так і для тривимірних.

## БУДУЩЕ

Інтенсивний інтерес до вивчення кавітаційних течій, який виник у 50-х роках, почав зменшуватися у 70-х. Частично це відбувалося через значительний прогрес, який суттєво розширив знання про цей предмет, і було викликане недостатком конкретного застосування в військово-морській сфері. Тим часом ці дослідження інтенсивно розвивалися в СРСР, особливо в Інституті гідромеханіки в Києві і в інших установах в Росії, де основна увага була зосереджена на русі високошвидкісних підводних ракет. Ці досягнення разом з теперешнім інтересом до високошвидкісних судів мають, я сподіваюся, шанси на відродження інтереса до суперкавітаційних течій з боку США.

1. *Birkhoff G.* Hydrodynamics, a study in logic, fact and similitude. – Princeton University Press. – 1950.
2. *Tulin M.P.* Steady two-dimensional cavity flows about slender bodies. – David Taylor Model Basin. – Report 834. – May 1953.
3. *Tulin M.P., Birkart P.* Linearized theory for flows about lifting foils at zero cavitation number. – David Taylor Model Basin. – Report C-638. – February 1955.
4. *Tulin M.P.* Supercavitating flow past foils and struts. – Proc. 1955, NPL Symposium on Cavitation in Hydrodynamics. – Philosophical Library. – New York. – 1956.
5. *Tulin M.P.* Supercavitating flows – small perturbation theory // J. of Ship Research. – 1964. – 7, N 3. – P. 16–37.
6. *Tulin M.P.* The shape of cavities in supercavitating flows. – Proc. of the 11th International Congress of Applied Mechanics (IUTAM). – Munich. – 1964. – PP. 1145–55.
7. *Garabedian P.R.* Calculation of axially symmetric cavities and jets // Pacific Journal of Mathematics. – 1956. – 6. – P. 611–689.
8. *Tulin M.P.* Supercavitating flows. Chapter 12II in Handbook of Fluid Dynamics, V.L. Streeter, editor-in-chief. – Mc Graw-Hill. – 1961, PP. 12-24 – 12-46.
9. *Tulin M.P.* Supercavitating flow past slender delta wings // J. of Ship Research. – 1959. – 3. – P. N 3.
10. *Tulin M.P.* The theory of slender surfaces planing at high speeds. – Forschungshefte für Schiffstechnik. – 1956-57. – Vol. 4.
11. *Tulin M.P.* New developments in the theory of supercavitating flow. – Proc. 2nd. ONR Symposium on Naval Hydrodynamics. – Washington. – 1958. Gov't Printing Office. – 1960.
12. *Cornell W.G.* Some aerodynamic cavity flows in flight propulsion systems. – Proc. 2nd. ONR Symposium on Naval Hydrodynamics – Washington. – 1958. – Gov't Printing Office. – 1960.
13. *Tulin M.P.* Supercavitating propellers- momentum theory // J. of Ship Research. – 1965. – 9, N 3. – P. 153–169.
14. *Tulin M.P.* Supercavitating flows and practical applications. In book "Cavitation in Real Fluids". – Proc. of a General Motors Laboratory Symposium, Elsevier Publ. Co. – 1964. – PP. 55 – 79.
15. *Tulin M.P.* Supercavitating propellers- history, operating characteristics, mechanism of operation. – Proc. of the 4th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics. – 1962. – Gov't. Printing Office. – 1964.
16. *Johnson V.E., jr.* The influence of depth of submergence, aspect ratio, and thickness on supercavitating hydrofoils operating at zero cavitation number. – Proc. 2nd. ONR Symposium on Naval Hydrodynamics. – Washington. – 1958. – Gov't Printing Office. – 1960.
17. *Johnson V.E., jr., Rasnick T.A.* Investigation of a high speed hydrofoil with parabolic thickness distribution. – NASA Tech. – Note D-119. – November 1959.
18. *Johnson V.E., jr.* Investigation of cavity flows by experimental means. In book "Non-steady flow of water at high speeds". – Proc. IUTAM Symposium, Leningrad, 1971. – Moscow: Nauka. – 1973. – PP. 59-83.
19. *Johnson V.E., jr., Tulin M.P.* The hydrodynamic characteristics of high speed hydrofoils. – Inst. Aero. Science, Paper No. 64-41. – IAS 29th Annual Meeting. – New York. – January 1961.
20. *Tulin M.P.* Prospects for high speed marine transport in the 21st century. – Proc. of the IMAM 2000 Congress. – Ischia. – Italy. – April 2000.
21. *Tulin M.P.* On the shape and dimensions of three-dimensional cavities in super-cavitating flows // Applied Scientific Research. – 1998. – 58. – P. 51–61.
22. Aerodynamically stabilized projectile system for use against underwater objects. – U.S. Patent 5,929,370. – July 27, 1999.
23. *Tulin M.P.* Free surface flows without waves. – Hydronautics Technical Report, 8035-2. – 1982.
24. *Tulin M.P., Oshri O.* Free surface flows without waves; applications to fast ships with low wave resistance. – Proc. 20th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics. – Santa Barbara, CA. – 1994. – National Academy Press. – Washington. – 1996.
25. *Hsu C.C., Chen C.F.* On the pulsation of finite ventilated cavities. – Hydronautics Technical Report 115-4. – 1962.
26. *Hsu C.C.* Some remarks on the progress of cavity flow studies // ASME Journal of Fluids Engineering. – 1975. – 97. – P. 439–452.
27. *Tulin M.P., Hsu C.C.* New applications of cavity flow theory. – Proc. 13th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics. – Tokyo. – 1980.