

Российская Академия Наук  
Российский Национальный Комитет по Теоретической и Прикладной Механике  
Академия Наук Башкортостана  
Московский Государственный Университет  
Чебоксарский Институт Московского Государственного Открытого Университета

*Вторая Международная Летняя Научная Школа*

# **ГИДРОДИНАМИКА БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ**

**Чебоксары, 27 июня-3 июля 2004**

**Тезисы**



## **MEMORIES OF THE GENERAL DESIGNER OF SPACE-ROCKET ENGINEERING VLADIMIR NIKOLAEVICH CHELOMEY (TO THE 90-ANNIVERSARY FROM BIRTHDAY)**

**Nadezhda Yu. Kishkina**

Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

In the report facts in issue of life and activity of academician Vladimir Nikolaevich Chelomey, twice the Hero of Socialist Work, the Winner Lenin and four State premiums, one of the famous scientists of mechanics, the engineer which works are widely known both in our country, and also in many foreign countries. The outstanding designer of aviation and space-rocket engineering, V.N. Chelomey within 10 years, with 1974 for 1984, was selected the deputy of a Supreme Soviet of the USSR from Chuvash Republic (former Chuvash ASSR).

V.N.Chelomey was born June, 30, 1914 in city of Sedlets, the childhood and youth have passed on Ukraine in Poltava. In 1937 has ended aviation faculty of the Kiev polytechnic institute, and in 1939 has protected the master's thesis. Since 1940 he studied and worked in Moscow in an Academy of Sciences of USSR, and since 1941 as scientific employer in CIAM where in 1943 creates for the first time in our country new type of the air-breathing engine (the pulsing engine), then cruise missiles of sea, air and

ground basing. In the beginning of 1945 these rockets were taken advantage the Soviet Army.

In 1951 he has protected in MVTU the thesis for a doctor's degree, and since 1952 - the professor, organizes in MVTU faculty "Dynamics of machines" where reads a rate of lectures on dynamic stability of oscillatory systems.

The special place in V.N.Chelomey's design works occupies his invention concerning disclosing of a wing of a rocket in flight. He for the first time has offered and has developed new type of a rocket, starting from the special transportable container. By development of devices of the following generation problems of movement of rockets on an underwater site were solved and created long working engines on hard fuel.

Since 1959 V.N.Chelomey is a general designer of objects of space-rocket engineering. Under his management rockets carriers and artificial satellites of the Earth, "Proton", "Flight", orbital stations "Salute - 3", "Salute - 5" and others are developed. The design of stations "Salute" became a basis of the head block of long-term space station "Mir". Experience of a rocket "Proton" was used at flight of the Moon pilotless and also with pilots by devices at soft landing to the Moon of automatic stations, flight of Venus and Mars, landing of automatic stations to these planets. In 60 and the beginning of 70th years first universal ballistic missile UR-200, and as the new automated complexes with universal rockets and the simplified mine launcher was created.

V.N.Chelomey's child is NTO of mechanical engineering - the only thing in the world the enterprise of the space-rocket branch conducting development of complexes of three various directions with cruise missiles, ballistic missiles and space vehicles.

In the report V.N.Chelomey's scientific and friendly mutual relation with academician L.I.Sedov, 30 years continued more will be marked.

At drawing up of the report documentary materials from the private affair of academician V.N.Chelomey, kept in Archive of the Russian Academy of Sciences, Scientific council of the Russian Academy of Sciences on the mechanics of liquids and gases, memoirs of professors G.N.Abramovich and S.N.Hrushchev, references, thematic encyclopedias, documents and photographic materials of the museum of academician V.N.Chelomey. The report will be accompanied by display of two films.

## **ПАМЯТИ ГЕНЕРАЛЬНОГО КОНСТРУКТОРА РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ВЛАДИМИРА НИКОЛАЕВИЧА ЧЕЛОМЕЯ (К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)**

**Надежда Ю. Кишкина**

Российская академия наук, Москва, Россия

В докладе кратко изложены основные факты жизни и деятельности академика Владимира Николаевича Челомея, дважды Героя Социалистического Труда, Лауреата Ленинской и четырех Государственных премий, одного из крупнейших ученых-механиков, инженера, работы которого широко известны как в нашей стране, так и за ее пределами. Выдающийся конструктор авиационной и ракетно-космической техники, В.Н.Челомей в течение 10 лет, с 1974 по 1984 год, избирался депутатом Верховного Совета СССР от Чувашской АССР.

Родился В.Н.Челомей 30 июня 1914 года в городе Седлец, детство и юность прошли на Украине в Полтаве. В 1937 году окончил авиационный факультет Киевского политехнического института, а в 1939 году защитил кандидатскую диссертацию. С 1940 года В.Н.Челомей в Москве – докторант АН СССР, а с 1941 года – научный сотрудник ЦИАМ имени П.И.Баранова, где в 1943 году создает впервые в нашей стране новый тип воздушно-реактивного двигателя (пульсирующий двигатель), затем крылатые ракеты морского, воздушного и наземного базирования. В начале 1945 года эти ракеты были приняты на вооружение Советской Армии.

В 1951 году он защитил в МВТУ докторскую диссертацию, а с 1952 года — профессор, организует в МВТУ кафедру “Динамика машин”, где читает курс лекций по динамической устойчивости колебательных систем.

Особое место в конструкторских работах В.Н.Челомея занимает его изобретение, касающееся раскрытия крыла ракеты в полете. Он впервые предложил и разработал новый тип ракеты, стартующей из транспортабельного специального пускового контейнера. При разработке аппаратов следующего поколения были решены вопросы динамики движения ракет морского базирования на подводном участке и созданы длительно работающие двигатели на твердом топливе.

С 1959 года В.Н.Челомей – генеральный конструктор объектов ракетно-космической техники. Под его руководством разработаны ракеты носители и искусственные спутники Земли, “Протон”, “Полеет”, орбитальные станции “Салют-3”, “Салют-5” и другие. Тяжелая пилотируемая орбитальная станция “Салют” подтвердила свою жизнеспособность при испытаниях станции “Салют-2”, “Салют-3”, Салют-5”. Конструкция станций “Салют” стала основой головного блока долговременной космической станции “Мир”. Опыт ракеты “Протон” был использован при облете Луны беспилотными и пилотируемыми аппаратами при мягкой посадке на Луну автоматических станций, облете Венеры и Марса, посадке автоматических станций на эти планеты.

В 60-х и начале 70-х годов была создана первая универсальная баллистическая ракета УР-200, а так же новые автоматизированные комплексы с универсальными ракетами и упрощенной шахтной пусковой установкой.

Детище В.Н.Челомея — НТО машиностроения – единственное в мире предприятие ракетно-космической отрасли, ведущее разработку комплексов трех различных направлений с крылатыми ракетами, баллистическими ракетами и космическими аппаратами.

В докладе будут отмечены научные и дружеские взаимоотношения В.Н.Челомея с академиком Л.И.Седовым, длившиеся более 30 лет.

При составлении доклада использованы документальные материалы из личного дела академика В.Н.Челомея, хранящиеся в Архиве Российской Академии Наук (РАН), Научного совета РАН по механике жидкостей и газов, воспоминания профессоров Г.Н. Абрамовича и С.Н.Хрущева, литературные источники, тематические энциклопедии, документы и фотоматериалы музея академика В.Н.Челомея ФГУП “НТО машиностроения” Реутово (Наукоград).

Доклад будет сопровождаться показом двух фильмов.

## **APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS METHODS FOR SOME HYDRODYNAMIC PROBLEMS**

**Victor S. Abrukov<sup>1,2</sup>, Daria A. Troeshestova<sup>1</sup>, Alexander S. Chernov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Chuvash State University, 15, Moskovskiy pr., 428015 Cheboksary, Russia

<sup>2</sup>Cheboksary's Institute of the Moscow State Open University  
54, Marks str., 428000 Cheboksary, Russia

Artificial neural networks (ANN) can be considered as universal tool for multidimensional approximation. The Kolmogorov-Arnold theorem dealing with capability of representation of multidimensional functions by means of superposition of functions of one variable is a basis of ANN application..

The ANN are computer codes training on examples. They represent some quantity of "neurons" each of which is an elementary processor realizing a mathematical function. The ANN can be presented often as "neurons" formed in layers. The input information goes on the first layer, then on the second layer and so on. After passing each layer, the information varies in accordance with synaptic weight of each neuron and its mathematical function. The synaptic weight is a contribution of each neuron calculation to a final result. The task of ANN training consist of a finding such synaptic weights, at which ones the input information will correctly be mapped in outcome information. A database for ANN training can be formed by means of various techniques.

Main advantage of ANN technologies of simulation is that they can be used at solution of problems, which ones have no obvious algorithmic solution. The ANN allow to reveal legitimacies of a system behavior on a basis of "inexact data" (or incomplete data) about the characteristics of the system. The main condition of successful application of ANN is a quality of the database used for training.

A short review of examples of ANN usage is presented in the paper.

1. New ways for solving of inverse problems of optics by means of artificial neural networks (ANN) are presented. A task of integral equations solution, i.e. a task of determination of an integrand (a distribution of local characteristics of object with known symmetry) by means of the integral meanings distribution is considered [1]. The main feature is the solution of an inverse problem by means of incomplete data about integral meanings distribution. It was shown that the ANN could reduce the values of an inte-

grand on all intervals of its change by means of only one value of an integral. A database for ANN training was obtained by means of solution of optics direct problems for various types of integrand. The way like this could be used for solution of inverse boundary-value problems in the field of HSH. A database for ANN training should be created by means of solutions of direct boundary-value problems for various types of analytically assigned functions and differential equations systems.

2. The possibilities of modeling of hydrodynamics phenomena and their forecasting by means of ANN [2] are discussed. The tasks of hard wall shock about a layer of fluid and of wave propagation on a free surface of a fluid were considered. It was shown that ANN could approximate the wave shape with a good accuracy. From a practical point of view, the major interest is a research of ANN feasibility for determination the impact force and coordinates of impact by means of a wave shape measured at unknown distance from impact.

3. The ANN models of combustion wave (CW) propagation are discussed. The new approach to solution of the task of experimental determination of the profiles of temperature and heat release rate by means of the ANN models and measurement of burning rate of combustion wave is represented [3]. The simplest ANN-model of one-dimensional CW, circumscribed by a differential heat conduction equation, can be obtained as follows. At first, a differential heat conduction equation has to be converted in algebraic by means of an analytically represented temperature profiles like sigmoid functions. Further, by means of variation of the sigmoid function parameter and both thermal and kinetic parameters, it is possible to obtain a set of burning rate values corresponding to a set of the sigmoid function parameters, thermal and kinetic parameters. The “database” obtained has to be used for ANN training and construction of ANN-model of CW.

4. An ANN model of deflagration-to-detonation transition under various experiment conditions is presented as a simple example of the ANN discovery possibilities. A deflagration-to-detonation transition under various experiment conditions was studied in [4]. The data presented in [4] had many blanks (about 60%). The task of filling them by means of ANN was set. The results obtained show that the ANN discovery possibilities are good.

5. An ANN model of automatic control system of boiler unit during transient processes was created. A database for training of ANN was obtained by means of system of finite-difference equations based on full dynamic non-linear mathematical model of boiler unit. The results obtained

show good perspectives of ANN usage for control during dynamic non-linear modes of a power loading variation, during non-stationary modes of deteriorated or critical heat transfer as well as during emergency on boiler unit.

### References

1. Abrukov V.S., Deltsov P.V., Schetinin V.G. Proceedings of the Seventh International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information & Engineering Systems (KES'2003, 3 – 5 September 2003, University of Oxford, Oxford, United Kingdom), Springer-Verlag., Vol.1., pp.684-690.

2. Abrukov V.S., Schetinin V.G., Troeshestova D.A., Deltsov P.V. The Book of International Summer Scientific School “High Speed Hydrodynamics”, (HSH – 2002, June 16 – 23, 2002, Cheboksary – Russia)/ Ed. by G.G. Cherny, M.P. Tulin, A.G. Terentiev, V.V. Serebryakov and Cortana Corporation, USA, Cheboksary, Russia/ Washington, USA, 2002, 391-394.

3. Abrukov V.S., Troeshestova D.A. The Book of Abstracts of SciCADE 2003 (SciCADE 2003 International Conference on Scientific Computation and Differential Equations, Trondheim, Norway, June 30 - July 4, 2003), p. 1-2.

4. Santoro R.J., Lee S.-Y., Conrad C. et al. Advances in Confined Detonation/ Ed. By G.D.Roy et al. – Moscow: Torus Press Ltd., 2002, pp. 243-249.

# **ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМ ГИДРОДИНАМИКИ**

**Виктор С. Аbruков<sup>1,2</sup>, Дарья А. Троещестова<sup>1</sup>,  
Александр С. Чернов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Чувашский государственный университет,  
15, Московский пр., 428015 Чебоксары, Россия

<sup>2</sup>Чебоксарский институт МГОУ,  
54, ул. К.Маркса, 428000 Чебоксары, Россия

Искусственные нейронные сети (ИНС) могут рассматриваться как универсальное средство многомерной аппроксимации. Основой применения ИНС служит теорема Колмогорова-Арнольда о возможности представления многомерных функций посредством суперпозиции функций одной переменной при заданной конечной точности.

Эмуляторы ИНС - компьютерные программы, в основе применения которых лежит обучение на примерах. Они представляют собой некоторое количество “нейронов”, каждый из которых является элементарным процессором, реализующим некоторую математическую функцию. ИНС могут быть представлены часто в виде “нейронов”, объединенных в слои. Входные данные поступают на первый слой, затем на второй и так далее. После прохождения каждого слоя, информация изменяется в соответствии с синаптическим весами каждого нейрона и его математической функцией. Синаптические веса отражают вклад каждого вычисления, производимого нейроном в конечный результат. Задача обучения нейронной сети состоит в определении таких синаптических весов, при которых входные данные будут правильно отображать заранее известные выходные данные. База данных для обучения ИНС может быть сформирована с помощью различных методик.

Основное преимущество технологий ИНС-моделирования состоит в том, что они могут использоваться при решении проблем, которые не имеют алгоритмического решения. ИНС позволяют выявлять закономерности поведения системы на основе “неточных данных” (неполной информации) о характеристиках системы. Основное условие успешного применения технологий ИНС - качество базы данных, используемой для обучения.

В данной работе приведен краткий обзор примеров использования ИНС.

1. Представлены новые пути решения обратных задач оптики с помощью ИНС. Рассматриваются задачи решения интегральных урав-



нений, то есть задачи определения подынтегрального выражения (распределения локальных характеристик объекта известной симметрии) с помощью распределения значений интегралов по линии регистрации оптического сигнала [1]. Основная особенность - решение обратных задач с помощью неполной информации о распределении значений интегралов. Показано, что ИНС позволяют получать значения подынтегрального выражения во всем интервале его изменения с помощью только одного значения интеграла. База данных для обучения ИНС получалась с помощью решения прямой задачи оптики для различных типов подынтегральных выражений. Аналогичный способ может использоваться для решения обратных краевых задач ГБС. База данных для обучения ИНС должна быть создана с помощью решений прямых краевых задач для различных типов аналитически заданных функций и систем дифференциальных уравнений.

2. Возможности моделирования гидродинамических процессов и их прогнозирования с помощью ИНС обсуждены в [2]. Рассматривалась задача удара жесткой стенки о слой жидкости и распространения волны по свободной поверхности жидкости. Было показано, что ИНС могут аппроксимировать форму волны с хорошей точностью. С практической точки зрения главный интерес в этом направлении исследований может представлять исследование применимости ИНС для определения сила удара и его координат с помощью измерения формы волны на неизвестном расстоянии от места удара.

3. Обсуждаются возможности получения ИНС-моделей распространения волны горения. Новый подход к решению задачи определения профилей температуры и скорости тепловыделения с помощью ИНС-моделей и экспериментального измерения скорости распространения волны горения представлен в [3]. Простейшая ИНС-модель одномерной стационарной волны горения, описываемой дифференциальным уравнением теплопроводности с источником тепла, может быть получена следующим образом. Сначала, дифференциальное уравнение теплопроводности должно быть преобразовано в алгебраические с помощью различных аналитически заданных, например с помощью сигмоидальных функций, распределений температуры возможных в волне горения. Далее, посредством изменения параметра сигмоиды, а также тепловых и кинетических параметров системы, можно получить набор значений скорости горения, соответствующих наборам значений параметров сигмоиды, тепловых и кинетических

параметров. Полученная “база данных” может быть использована для обучения ИНС и построения ИНС-модели волны горения.

4. ИНС-модель перехода от горения к детонации при различных условиях эксперимента представлена как простой пример «предсказательных» возможностей ИНС. Переход от горения к детонации при различных условиях эксперимента изучался в [4]. Данные, представленные в [4] имели много пробелов (приблизительно 60 %). Задача предсказания их с помощью ИНС была поставлена в данной работе. Полученные результаты показали хорошие «предсказательные возможности» возможности ИНС.

5. Обсуждаются возможности создания ИНС-модели системы автоматического управления котлоагрегатом ТЭЦ в переходных режимах. База данных для обучения ИНС была получена с помощью системы конечно-разностных уравнений, соответствующих полной нелинейной динамической математической модели процессов, протекающих в пароперегревателе котлоагрегата. Полученные результаты показали хорошие перспективы использования ИНС для управления в период динамических нелинейных режимов изменения нагрузки, в нестационарных режимах ухудшенного теплообмена, а также при возникновении кризисного режима испарения в котлоагрегате.

### Литература

1. Abrukov V.S., Deltsov P.V., Schetinin V.G. Proceedings of the Seventh International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information & Engineering Systems (KES'2003, 3 – 5 September 2003, University of Oxford, Oxford, United Kingdom), Springer-Verlag., Vol.1., pp.684-690.

2. Abrukov V.S., Schetinin V.G., Troeshestova D.A., Deltsov P.V. The Book of International Summer Scientific School “High Speed Hydrodynamics”, (HSH – 2002, June 16 – 23, 2002, Cheboksary – Russia)/ Ed. by G.G. Cherny, M.P. Tulin, A.G. Terentiev, V.V. Serebryakov and Cortana Corporation, USA, Cheboksary, Russia/ Washington, USA, 2002, 391-394.

3. Abrukov V.S., Troeshestova D.A. The Book of Abstracts of SciCADE 2003 (SciCADE 2003 International Conference on Scientific Computation and Differential Equations, Trondheim, Norway, June 30 - July 4, 2003), p. 1-2.

4. Santoro R.J., Lee S.-Y., Conrad C. et al. Advances in Confined Detonation/ Ed. By G.D.Roy et al. – Moscow: Torus Press Ltd., 2002, pp. 243-249.

# MINIMIZATION OF AN AIRFOIL DRAG COEFFICIENT USING OPTIMUM CONTROL METHODS

**Damir F. Abzalilov**

Chebotarev Institute of Mathematics and Mechanics,  
Kazan State University  
17, Universitetskaya Str., 420008, Kazan, Russia

The most effective way of design airfoils with optimal aerodynamic characteristics is based on the solution of inverse boundary-value problems of aerohydrodynamics. Given velocity distribution is connected with the circulation of a fluid directly and, hence, with the lift coefficient of an airfoil. The drag coefficient of an airfoil is not connected with velocity distribution directly, at first is necessary to perform boundary layer (BL) calculation and only after that, for example, using the Squire-Young formula or by direct integration of viscous forces to define the drag. Therefore the problem of specifying of optimum velocity distribution (especially on the pressure recovery region) is actual problem.

At present work the problem of an airfoil design by a velocity distribution given on the airfoil's contour is considered. A velocity distribution is specified with several free parameters, and on the pressure recovery region the velocity decreasing type is determined from condition of minimum drag coefficient and condition of no-separation. The Reynolds number on infinity is given. The integral BL calculation method is based on joint integration of the equations of momentum and energy with the fixed relations between formparameters and coefficients of friction and energy dissipation [1].

Known way of drag reduction on an airfoil is BL suction. The case of using suction for improving aerodynamic characteristics of an airfoil is investigated. In this case the sum of the drag coefficient and the coefficient of energy consumption was minimized. Was considered, a BL thickness and suction do not influence on an external stream.

For airfoil design by given velocity distribution the theory of inverse boundary-value problems of aerohydrodynamics [2] is used. Three solvability conditions (conditions of airfoil closure and the condition of coinciding of specifying velocity on infinity with velocity, determined from solution) are fulfilled by a variation of three free parameters.

The problem of finding of velocity distribution on the pressure recovering region is formulated in terms of optimum control problems, as

control functions the gradient of velocity and BL suction velocity are chosen. Solution was performed using the Pontryagin's maximum principle.

The work was supported by RFFI (the project No 02-01-00061) and by NIOKR fund of Tatarstan Republic.

### References

1. *Eppler R.* Airfoil design and data. Berlin: Springer-Verlag, 1990. 512 p.

2. *Elizarov A.M., Il'inskiy N.B., Potashev A.V.* Mathematical methods of airfoils design (inverse boundary-value problems of aerohydrodynamics). Berlin: Akademie Verlag, 1997. 292 p.

## МИНИМИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ КРЫЛОВОГО ПРОФИЛЯ МЕТОДАМИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Дамир Ф. Абзалилов

НИИ математики и механики

Казанского государственного университета  
17, ул. Университетская, 420008, Казань, Россия

Наиболее эффективный способ построения оптимальных по аэродинамическим характеристикам крыловых профилей основан на решении обратных краевых задач аэрогидродинамики. Задаваемое в них распределение скорости напрямую связано с циркуляцией жидкости и, следовательно, с коэффициентом подъемной силы крылового профиля. Коэффициент сопротивления крылового профиля не связан с распределением скорости напрямую, предварительно необходимо произвести расчет пограничного слоя (ПС) и лишь после этого, например, по формуле Сквайра-Юнга или непосредственным интегрированием вязких сил определить сопротивление. Поэтому задача определения оптимального распределения скорости (особенно на диффузорном участке) является актуальной.

В работе рассматривается задача построения крылового профиля по заданному распределению скорости (давления) на его поверхности. Распределение скорости задается в многопараметрическом виде, причем на диффузорном участке закон падения скорости находится из условия минимальности сопротивления и ограничения на безотрывность обтекания при заданном числе Рейнольдса на бесконечности.

Интегральный метод расчета ПС основан на совместном интегрировании уравнений импульсов и энергии с установленными отношениями для коэффициентов трения и диссипации энергии [1].

Известным способом уменьшения коэффициента сопротивления крылового профиля является отсос ПС. Исследован случай использования отсоса ПС для улучшения аэродинамических характеристик крыловых профилей. В последнем случае минимизировалась сумма коэффициента вязкого сопротивления и коэффициента энергетических затрат на отсос. Считалось, что толщина ПС и отсос не влияют на скорость внешнего потока.

Для построения профиля по заданному распределению скорости использовалась теория обратных краевых задач аэрогидродинамики (см., напр., [2]). Выполнение трех условий разрешимости (условия замкнутости контура крылового профиля и условие совпадения заданной скорости на бесконечности с определяемой в процессе решения) достигалось вариацией трех свободных параметров.

Задача нахождения распределения скорости на диффузорном участке сформулирована в терминах задач оптимального управления, в качестве управляющих функций выбраны градиент скорости внешнего течения и скорость отсоса ПС. Для решения использован принцип максимума Понтрягина.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 02-01-00061) и фонда НИОКР Республики Татарстан.

#### **Литература**

1. *Eppler R.* Airfoil design and data. Berlin: Springer-Verlag, 1990. 512 p.
2. *Елизаров А.М., Ильинский Н.Б., Поташев А.В.* Обратные краевые задачи аэрогидродинамики. М.: Наука, 1994. 440 с.

## **NUMERICAL SIMULATION OF INTERACTION OF SURFACE WAVES WITH A SOLID PARTIALLY SUBMERGED INTO A FLUID**

**Konstantin E. Afanasiev, Evgeny N. Berezin**

Kemerovo State University, 6, Krasnaya str., 650043 Kemerovo, Russia

The theory of motion of a fluid with free boundaries is one of the most thriving trends of modern hydrodynamics. Plenty of works are de-

voted to the matters of interaction of surface waves with obstructions. Problems of this class can find numerous technical applications during projection of maritime works. One of the most important problems is determination of influence of surface waves on these objects. Engineering approaches of calculation of the influence of surface waves on hydraulic structures are based on a large number of assumptions and have considerable inaccuracy. Analytical methods can lead to an accurate enough solution, however while using them it is difficult to hope for precise description of local characteristics of the flow.

In accordance with the building codes and rules current in the Russian Federation [1], applying to riverside and maritime works, the main parameter for projection of a hydraulic structure is the load produced by disturbance of the water surface. According to Item 1.13 [1], determination of the vertical wall loads caused by the influence of landwash waves can be executed by dynamical methods, considering the pressure impulses and inertial forces. That is why the calculating experiment on the basis of the mathematical model is of practical interest since it helps to reproduce the wave pattern of flow accurately enough and to calculate the dynamical characteristics.

The present work considers numerical solution of the problem of wave motion of the ideal incompressible fluid in a pool of the constant depth  $H = 1$ , arising as a result of a soliton swash onto a partially submerged fixed solid. The calculations are executed for the area  $D \in [-15, 30]$ . The wave top for all the calculations at  $t = 0$  is located in the point  $x = -5$ . The variable parameters of the problem are the values: the wave amplitude  $A$ , the distance from the bottom to the obstruction  $h$ , the solid width  $a = x_\gamma - x_l$ , where  $x_l$  and  $x_\gamma$  are the abscissas of the left and the right vertical walls of the solid,  $b$  is the distance between the right wall of the solid at  $(x = x_\gamma)$  and the right boundary of the pool.

In case of increase of the wave amplitude  $A$ , the gap  $h$  and decrease of the solid width the modes of wave breaking are observed. The wave breaks backward during its backwash off the left wall of the solid but in the opposite direction to the solitary wave motion in the initial moment of time. For different values of the amplitude  $A$  of the incoming wave we have investigated the influence of the solid width  $a = 1, a = 2, a = 4, a = 8$  and the distance from the bottom to the obstruction  $h = 0, 4$  on the value of the

maximal overwash  $Y_l$  onto the left wall of the solid, of the maximal overwash  $Y_r$  onto the right wall of the solid, of the amplitude of the reflected wave  $a_0$ , of the amplitude of the past wave  $a_p$  and the dynamic load  $P_s$  of the wave pressure on the left and the right walls of the solid. The numerical calculations have shown that in case of increase of the solid width and decrease of the distance  $h$  the overwash values on the left wall of the solid, the amplitude of the reflected wave and the dynamic load on the left wall of the solid increase, while the overwashes on the right wall of the solid, the amplitude of the past wave and the dynamic load on the right wall of the solid decrease. Such behavior of the characteristics is also mentioned in the work [4].

If the solid is located near the right vertical wall of the pool, almost even oscillations of the fluid column take place in the gap between the right wall of the solid and the right wall of the pool. During these oscillations the fluid level can exceed the value of the amplitude of the incoming wave. In this case the maximal overwash on the right wall of the solid can exceed the value of the overwash on the left wall of the solid, what is not observed if the solid is located far from the right wall of the pool. In case of increase of the distance  $h$  from the pool bottom to the solid, dewatering of the lower boundary of the solid can take place.

The problem in its full nonlinear statement is solved by the boundary element method (BEM). For description of the paths of the particles (points) of the free boundary, the Lagrange method should be applied. At that, the Cauchy-Lagrange integral and the kinematical condition on the fluid free boundaries are written as usual differential first-order equations. The problem is nonstationary, and is solved by the Euler method. The methods of solution of the integral equation, selection of the step on time, differentiation of the functions established on the boundary and consideration of peculiarities in case of modification of the type of boundary conditions are described in the works [2, 3].

### References

1. SNiP (Construction norms & regulations) 2.06.04-82 «Loads and influences on hydraulic structures (of waves, ice and ships)»; Official edition, 1982.
2. Afanasiev K.E., Goudov A.M. Information technologies in numerical calculations: Educational manual. - Kemerovo: KemSU, 2001. – 204pp.

3. Brebbia C., Telles J., Wrobel L. Boundary element methods. Mir, Moscow, 1987.

4. Khakimzyanov G.S., Shokin Y.I., Barakhnin V.B., Shokina N.Y. Numerical modeling of fluid flows with surface waves. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of RAS, 2001.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА ЧАСТИЧНО ПОГРУЖЕННОЕ В ЖИДКОСТЬ ТЕЛО**

**Константин Е. Афанасьев, Евгений Н. Березин**

Кемеровский Государственный Университет

Красная 6, 650043 Кемерово, Россия

Теория движения жидкости со свободными границами является одним из наиболее бурно развивающихся направлений современной гидродинамики. Вопросам взаимодействия поверхностных волн с препятствиями посвящено множество работ. Задачи такого класса могут находить многочисленные технические приложения при проектировании морских сооружений. Одной из важнейших задач является определение воздействия поверхностных волн на эти объекты. Инженерные методы расчета воздействия поверхностных волн на гидротехнические сооружения основаны на большом количестве допущений и имеют значительную погрешность. Аналитические методы могут дать достаточно точное решение, однако при их использовании трудно надеяться на точное описание локальных характеристик течения.

По строительным нормам и правилам, действующим в Российской Федерации [1], распространяющимся на речные и морские гидротехнические сооружения, основным параметром при проектировании гидротехнического сооружения служит нагрузка, создаваемая волнением поверхности воды. В соответствии с пунктом 1.13 [1], определение нагрузок на вертикальную стену от воздействия прибойных волн допускает производить динамическими методами, учитывающими импульсы давления и инерционные силы. Поэтому вычислительный эксперимент на основе математической модели представляет практический интерес, так как с его помощью можно достаточно точ-



но воспроизводить волновую картину течения и рассчитать динамические характеристики.

В настоящей работе рассматривается численное решение задачи о волновом движении идеальной несжимаемой жидкости в бассейне постоянной глубины  $H = 1$ , возникающем в результате наката солитона на частично погруженное закрепленное тело. Расчеты проводились для области  $D \in [-15, 30]$ . Вершина волны для всех расчетов находилась при  $t = 0$  в точке  $x = -5$ . Варьируемыми параметрами задачи были величины амплитуда волны  $A$ , расстояние от дна до препятствия  $h$ , ширина тела  $a = x_\gamma - x_l$ , где  $x_l$  и  $x_\gamma$  абсциссы левой и правой вертикальных стенок тела,  $b$  - расстояние между правой стенкой тела при ( $x = x_\gamma$ ) и правой границей бассейна.

При увеличении амплитуды волны  $A$ , зазора  $h$  и уменьшении ширины тела наблюдаются режимы опрокидывания. Волна опрокидывается назад во время отката от левой стенки тела, но в противоположном направлении относительно движения в начальный момент времени уединенной волны. Для различных значений амплитуды  $A$  набегающей волны изучалось влияние ширины тела  $a = 1$ ,  $a = 2$ ,  $a = 4$ ,  $a = 8$  и расстояния от дна до препятствия  $h = 0,4$  на величину максимального заплеска  $Y_l$  на левую стенку тела, максимального заплеска  $Y_\gamma$  на правую стенку тела, амплитуды отраженной волны  $a_0$ , амплитуды прошедшей волны  $a_p$  и динамической нагрузки  $P_s$  волнового давления на левой и правой стенках тела. Численные расчеты показали, что при увеличении ширины тела и уменьшении расстояния  $h$  величины заплесков на левой стенке тела, амплитуда отраженной волны и динамическая нагрузка на левой стенке тела возрастают, а заплески на правой стенке тела, амплитуда прошедшей волны и динамическая нагрузка на правой стенке тела убывают. Такое поведение характеристик, так же отмечается в работе [4].

Если тело расположено вблизи правой вертикальной стенки бассейна, то в зазоре между правой стенкой тела и правой стенкой бассейна происходит почти равномерное колебания столба жидкости. Уровень жидкости при этих колебаниях может превосходить величину амплитуды набегающей волны. Для данного случая максимальный заплеск на правой стенке тела может превосходить величину заплеска

на левой стенке тела, чего не наблюдается при расположении тела далеко от правой стенки бассейна. При увеличении расстояния  $h$  от дна бассейна до тела может происходить осушение нижней границы тела.

Задача в полной нелинейной постановке решается методом граничных элементов (МГЭ). Для описания траекторий частиц (точек) свободной границы применяется метод Лагранжа. При этом, интеграл Коши-Лагранжа и кинематическое условие на свободных границах жидкости записываются в виде обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Задача является нестационарной и для ее решения применяется метод Эйлера. Методика решения интегрального уравнения, выбор шага по времени, дифференцирование функций заданных на границе и учет особенности при смене типа граничных условий изложены в работах [2,3].

### Литература

1. СНИП 2.06.04-82 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов); Официальное издание, 1982г.
2. Афанасьев К.Е., Гудов А.М. Информационные технологии в численных расчетах: Учебное пособие. - Кемерово: КемГУ, 2001. - 204с.
3. Бребия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. Мир, Москва, 1987.
4. Хакимзянов Г.С., Шокин Ю.И., Барахнин В.Б., Шокина Н.Ю. Численное моделирование течений жидкости с поверхностными волнами. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001.

## NUMERICAL MODELLING OF DYNAMICS A THREE-DIMENSIONAL VAPOUR-GAS BUBBLES

**Konstantin E. Afanasiev, Irene V. Grigorieva**

Kemerovo state university, 6, Krasnaya str., 650099 Kemerovo, Russia

The work is devoted to investigation of dynamics of a three-dimensional gas-vapor bubble in an inviscid incompressible fluid. The flow is assumed to be irrotational. The work considers evolution of a gas-vapor cavity both in the inviscid incompressible ambient fluid and near different solid walls. Main attention is paid to investigation of interaction of the gas-vapor cavity with different inclined solid walls.

The described in this work model is applied for simulation of different, unlike, on the face of it, phenomena. On the one hand, we consider dynamics of underwater explosions, on the other hand, we predict the damage caused by cavitation erosion, when study of the whole phenomenon of bubble cavitation is not possible without study of a single, taken individually, cavity bubble. So what is common for these unlike, on the face of it, phenomena? One of such features is caused cumulative effects. The bubble developing from a cavitation germ (if it is a cavitation bubble), or forming as a result of detonation products impact (if under consideration is an underwater explosion), in the process of its growth, as a rule, keeps its shape close to spherical. Having reached its most volume the bubble passes into the phase of shrinkage. The solid wall closeness and (or) the effect of gravity break one-dimensionality of the flow, even if in the moment of its maximal expansion the cavity is spherical. In some cases in the process of the bubble shrinkage the jet of fluid is formed and penetrates into the bubble up to the moment of its contact with the opposite wall. This jet can be directed toward the wall and its velocity can be of the order of several hundred, and in especial conditions, even several thousand meters per second. Particles on the bubble surface farthest from the wall, in case when the jet is directed toward the wall, are accelerated at the most, i.e. the classical cumulative effect takes place. It is assumed that the mechanism of target destruction is determined just by the influence of the high-speed cumulative jet formed on the stage of the bubble shrinkage. This work considers possibility of prediction of the direction of the bubble migration and of the jet development by means of the Kelvin impulse. The work describes methods of estimation of the damage caused by the bubble to the solid wall. Under consideration is evolution of the bubble near different inclined solid walls. The problem is solved in full nonlinear spatial statement. As a tool of numerical investigation we apply the boundary element method in terms of function of potential of speed and its normal derivative, based on of Green's third formula. The surface of a bubble is approximated by triangular elements on which the potential and its normal derivative are considered as linear functions. For motion on time we apply the first-order Euler scheme.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ**

**Константин Е. Афанасьев, Ирина В. Григорьева**

Кемеровский государственный университет,  
ул. Красная 6, 650099 Кемерово, Россия

Работа посвящена исследованию динамики пространственного парогазового пузыря в идеальной несжимаемой жидкости. В ней рассматривается эволюция паровой и парогазовой сферической каверны в безграничной идеальной несжимаемой жидкости, изучается влияние силы тяжести и газосодержания на процесс эволюции пузыря. Основное внимание уделяется изучению взаимодействия парогазовой полости с различными твердыми стенками.

Описанная в данной работе модель применяется для моделирования различных, непохожих на первый взгляд, явлений. С одной стороны рассматривается динамика подводных взрывов, с другой стороны прогнозируется урон от кавитационной эрозии, когда изучение всего явления пузырьковой кавитации невозможно без изучения динамики одной, отдельно взятой, кавитационной полости. Эти, непохожие на первый взгляд, явления объединяют возникающие кумулятивные эффекты. Пузырь, развиваясь из кавитационного зародыша, или образующийся при взрыве заряда, в процессе своего роста, как правило, сохраняет форму близкую к сферической. Достигнув наибольшего объема, пузырь переходит в фазу замыкания. Близость твердой границы и (или) действие силы тяжести нарушают одномерность течения, даже если в момент максимального расширения полость была сферической. В ряде случаев в процессе замыкания пузыря формируется струйка жидкости, внедряющаяся в пузырь до момента касания его противоположной стенки. Такая струя может быть направлена в сторону стенки и иметь скорость порядка сотен, а при особых условиях, даже тысяч метров в секунду. Частицы на дальней от стенки поверхности пузыря, в случае если струя направлена к стенке, получают большее ускорение, то есть возникает классический кумулятивный эффект. Предполагается, что механизм разрушения мишеней определяется именно воздействием высокоскоростной кумулятивной струи, формирующейся на стадии замыкания пузыря. Поэтому актуальной задачей является выяснение роли различных факторов, таких как на-

личие газа в пузыре, действие силы тяжести, положение твердой стенки на процесс образования и развития кумулятивной струи.

Задача решается в полной нелинейной пространственной постановке. В качестве инструмента численных исследований выбран метод граничных элементов в терминах функции потенциала скорости и его нормальной производной на основе третьей формулы Грина. Поверхность пузыря аппроксимируется треугольными элементами, на которых потенциал и его нормальная производная считаются линейными функциями. Для движения по времени используется схема Эйлера первого порядка.

## **STABILITY OF THE SPHERICAL SHAPE OF A BUBBLE UNDER ITS**

### **SINGLE STRONG ENLARGEMENT-COMPRESSION**

**Alexander A. Aganin, Tatyana S. Guseva**

Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center RAS

2/31, Lobachevsky str., 420111 Kazan, Russia

In 1990 a phenomenon of periodic light emission by a small gas bubble in ultrasonic standing wave (single bubble sonoluminescence, SBSL) was experimentally discovered [1]. Investigation of the SBSL phenomenon has shown that very high compression rates of the gas in the bubble can be achieved by means of enlargement-compression of a small bubble. In fact, according to some estimates, in the regime of SBSL the temperatures and the densities of the gas in the bubble at the time of its maximum compression (collapse) become equal to the values of  $\sim 10^4\text{K}$  and of  $\sim 10^3\text{kg/m}^3$ , respectively. Attempts of attaining even higher rates of compression of the gas in the bubble in the regime of periodic sonoluminescence run into rather severe restrictions of stability conditions of periodic oscillations. In this sense the regime of single strong bubble enlargement-compression seems to be much more prospective. Therefore, investigation of opportunities of realization of this regime is of significant interest. One of restrictions of such opportunities is caused by distortion of the spherical shape of the bubble. It is evident that to attain high compression rates of the gas in the bubble the bubble shape must be kept close to the spherical one till the moment of collapse. Otherwise, the high rate of the acoustic energy cumulation will not be derived. Publications on distortion of the spherical shape

of a bubble are mainly devoted to the regime of periodic SBSL [1].

In the present work we study stability of the spherical shape of a gas bubble a few micron in size during its single strong enlargement-compression. In the finite time interval the stability of the spherical shape of the bubble is identified with decreasing the amplitude of its distortions. The case of air bubble in water is considered under room conditions. The bubble is located in the center of a spherical volume of a liquid. The boundary between the gas and the liquid is considered as a free surface with allowing for its capillary forces. The pressure on the external surface of the liquid sphere varies with respect to the harmonic law starting in the stage of its lowering. Strong enlargement-compression of the bubble is attained due to great values of the external pressure variation amplitudes (1.4-5 greater than the static liquid pressure). The size of the bubble is small as compared with the length of the external pressure wave. The ratio of maximum bubble volume to its minimum value under consideration is significantly higher than that observed for SBSL. Prior to the beginning of variation of the pressure in the liquid the shape of the bubble executes oscillations with small amplitude. The volume of the bubble during these oscillations remains constant. Gas dynamics equations with allowing for heat conduction are used to describe the gas and the liquid motion. In order to reduce the computational time consumption a number of approximations to gas dynamics equations are applied when velocities of the bubble surface motion are relatively small (homobaric approximation for the gas in the bubble, approximation of low compressible liquid and linear acoustics for the surrounding liquid) [2]. Equations of states of the gas and the liquid are used in the form adequate to high levels of temperature and pressure arising during the simulation [2]. The liquid viscosity effect during the bubble shape oscillations is described similar to [3].

Strong dependence of the value of the distortion of the spherical shape of the bubble during its enlargement-compression has been found on the phase of oscillations of the bubble shape at the moment of the beginning of the bubble enlargement (initial phase). Stability of the spherical enlargement-compression of the bubble is investigated utilizing the worst scenario. It has been found that in the range of excitation amplitudes under consideration the distortion amplitude at the bubble collapse appears to be 5–500 times more than their initial value. In the extremely short finale interval of bubble compression stage where the radial velocities decrease from vary large values to zero the distortion amplitude increases by a factor of about 2.

This work was supported in part by the Russian Foundation of Basic Research (project 02-01-00100), the Program of Basic Research of the RAS (project “Dynamics of non-spherical gas and vapor bubbles in a liquid under strong and super-strong enlargement-compression”) and the Federal Target Program "Integration" (project B0020).

### References

1. Putterman S.J. and Weninger K.P. Sonoluminescence: How Bubbles Turn Sound into Light //Ann. Rev. Fluid Mech., 2000, 32, 445–476.
2. Aganin A.A., Ilgamov M.A. Dependence of Bubble Compression Parameters on the External Pressure // Dynamics of Multiphase Systems. Proc. Int. Conf. Multiphase Systems, Ufa, 2000. P. 269–274.
3. Aganin A.A., Ilgamov M.A. A simplest model of viscosity in the dynamic of a liquid with cylindrical cavity // In: “Problemy mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela”: Mezhev. Sb. SPbGU. S.-Peterburg: SPbGU, 2002, 14–20. (in Russian)

## УСТОЙЧИВОСТЬ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПУЗЫРЬКА ПРИ ЕГО ОДНОКРАТНОМ СИЛЬНОМ РАСШИРЕНИИ-СЖАТИИ

Александр А. Аганин, Татьяна С. Гусева

Институт Механики и Машиностроения

Казанский Научный Центр РАН

2/31, ул. Лобачевского, 420111 Казань, Россия

В 1990г экспериментально было открыто явление периодического испускания света маленьким пузырьком, находящимся в ультразвуковой стоячей волне (single bubble sonoluminescence – SBSL) [1]. Изучение явления SBSL показало, что путем расширения-сжатия маленького пузырька можно достичь высоких степеней сжатия газа в пузырьке. Действительно, по оценкам на режиме SBSL температура и плотность газа в пузырьке в момент его максимального сжатия (коллапса) принимают значения порядка  $\sim 10^4\text{K}$  и  $\sim 10^3\text{кг/м}^3$ , соответственно. Попытки достижения еще больших степеней сжатия газа в пузырьке на режиме периодической сонолюминесценции наталкиваются на довольно жесткие ограничения устойчивости периодических колебаний. В этом смысле намного более перспективным представляется режим однократного сильного расширения-сжатия пузырька. Поэтому изучение возможностей

его реализации представляет значительный интерес. Одно из ограничений таких возможностей обусловлено искажением сферической формы пузырька. Очевидно, что для достижения высоких степеней сжатия газа в пузырьке необходимо, чтобы форма пузырька до коллапса оставалась близкой к сферической. Иначе высокая степень кумуляции акустической энергии достигнута не будет. Публикации по искажению сферической формы пузырька при его расширениях-сжатиях относятся, в основном, к периодическому режиму SBSL [1].

Настоящая работа посвящена исследованию устойчивости сферической формы газового пузырька микронных размеров в ходе его однократного сильного расширения-сжатия. На конечном отрезке времени устойчивость сферической формы пузырька отождествляется с уменьшением амплитуды ее искажений. Рассматривается случай воздушного пузырька в воде при комнатных условиях. Пузырек находится в центре сферического объема жидкости. Поверхность контакта между жидкостью и газом трактуется как свободная граница с учетом действующих на ней капиллярных сил. Давление на внешней поверхности жидкой сферы изменяется по гармоническому закону, начиная со стадии понижения. Сильное расширение-сжатие пузырька достигается за счет больших значений амплитуды изменения давления (в 1.4-5 раз превышающей статическое давление). Размеры пузырька малы по сравнению с длиной волны внешнего давления. Рассматриваемые отношения максимального и минимального объемов пузырька намного больше тех, что наблюдаются при SBSL. До начала изменения давления в жидкости форма пузырька совершает колебания с малой амплитудой. Объем пузырька при этом остается неизменным. Для моделирования движения жидкости и газа используются уравнения газовой динамики с учетом теплопроводности среды. В целях существенного понижения затрат компьютерного времени при относительно небольших скоростях движения поверхности пузырька применяется ряд приближений уравнений газовой динамики (гомобарическое приближение для газа в пузырьке, приближения малосжимаемой жидкости и линейной акустики для окружающей жидкости) [2]. Используются уравнения состояния жидкости и газа, адекватные высоким уровням давлений и температур, возникающим в задаче. Для описания изменения искажения сферической формы пузырька применяется модель с приближенным учетом эффекта вязкости жидкости [3].

Выявлена сильная зависимость величины искажений сферической формы пузырька в ходе его расширения-сжатия от фазы колеба-



ний формы пузырька в момент начала расширения (начальной фазы). Устойчивость сферического расширения-сжатия анализируется по наихудшему сценарию. Установлено, что при исследуемых амплитудах внешнего воздействия величина искажения в момент коллапса пузырька оказывается в 5–500 раз больше начального значения. На заключительном очень коротком интервале стадии сжатия пузырька, где радиальные скорости уменьшаются от огромных значений до нуля, величина искажения увеличивается примерно в 2 раза.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта 02-01-00100), в рамках программы фундаментальных исследований РАН (проект «Динамика несферических газовых и паровых пузырьков в жидкости на режимах с сильным и сверхсильным расширением-сжатием») и федеральной целевой программы «Интеграция» (код проекта Б0020).

### Литература

4. Putterman S.J. and Weninger K.P. Sonoluminescence: How Bubbles Turn Sound into Light // *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 2000, 32, 445–476.

5. Aganin A.A., Ilgamov M.A. Dependence of Bubble Compression Parameters on the External Pressure // *Dynamics of Multiphase Systems. Proc. Int. Conf. Multiphase Systems, Ufa, 2000*. P. 269–274.

6. Аганин А.А., Ильгамов М.А. Простейшая модель вязкости в динамике жидкости с цилиндрической полостью // В сб. Проблемы механики деформируемого твердого тела : Межвуз. Сб. СПбГУ. С.-Петербург: СПбГУ, 2002, 14–20.

## LIQUID VISCOSITY EFFECT IN DYNAMICS OF A NONSPHERICAL BUBBLE

**Alexander A. Aganin, Dmitry Yu. Toporkov**

Institute of Mechanics and Engineering KSC

of the Russian Academy of Science

2/31, Lobachevsky str., 420111 Kazan, Russia

A phenomenon of nuclear radiation during acoustic cavitation (output of neutrons and tritium nuclei under acoustic excitation of a cluster of vapor bubbles in liquid deuterated acetone, 2002) [1] recently discovered experimentally is currently actively discussed. According to [1], for experi-

mental realization of the phenomenon of nuclear radiation a standing wave of pressure with amplitude of 15 bar in the antinode is formed inside the resonator with liquid deuterated acetone initially without bubbles. At so high amplitude of oscillations the liquid pressure lowers to such the negative values which are close to the liquid rapture threshold so that a small additional perturbation can be enough to the liquid cavitation. In experiments of [1] bubbles are formed from a neutron source which is switched on at the moment slightly prior to the maximal pressure lowering in a standing wave. At the moment of switching on the neutron source tiny bubbles of a few nanometers in size are formed in liquid. During the phase of negative pressure in liquid the bubble size increases very much to become on the order of millimeter. Nuclear radiation is observed in the subsequent phase of positive liquid pressure where bubbles are very rapidly and strongly compressed.

In opinion of authors of [1], states of substance with temperatures up to one million degrees and even higher arise in vapor bubbles at the moment of their maximum compression, and this is the cause of the nuclear radiation. The most important condition for so strong bubble compression is preservation of the bubble shape close to the spherical one down to the moment of the maximum bubble compression. In the present work variation of small distortions of the spherical shape of a single bubble is studied during its expansion-compression in experimental conditions [1]. The main attention is drawn to influence of viscosity of the liquid since it can be very significant at the small sizes of the bubble. The mathematical model in which the liquid near the bubble is viscous incompressible, vapor is ideal with homogeneous distribution of pressure is used. Processes of non-equilibrium evaporation-condensation and non-stationary heat conduction in vapor and a liquid are taken into account. The exact model by Prosperetti, 1977 [2] and a number of the approximate ways of description of influence of viscosity of a liquid are applied. In the approximate ways effects of non-stationary diffusion of liquid vorticity are not taken into account.

Character of variation of distortion of the spherical shape of the bubble has been investigated during its expansion-compression. Influence of viscosity of a liquid on variation of the distortion has been found to be strongly dependent on both the initial size of the bubble and the moment of oscillation of pressure in a liquid at which the bubble is formed. In particular, at the moment of the maximum compression of the bubble the amplitude of the distortion of its spherical shape can be both more and less than the initial one in tens and hundreds times. The neglect of effect of viscosity

of a liquid can result in multiple (up to 100 times) overestimate of value of distortion of the spherical shape of the bubble at the moment of its maximum compression.

This work was supported in part by the Russian Foundation of Basic Research (project 02-01-00100), the Program of Basic Research of the RAS (project "Dynamics of non-spherical gas and vapor bubbles in a liquid under strong and super-strong enlargement-compression") and the Federal Target Program "Integration" (project B0020).

#### References

1. Taleyarkhan R.P., West C.D., Cho J.S., Lahey R.T. (jr), Nigmatulin R.I., Block R.C. Evidence for Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation //Science, 2002, **295**, 1868-1873.

2. Prosperetti A. Viscous effects on perturbed spherical flows //Quarterly of Appl. Math, **34**, 1977, 339-352.

### **ЭФФЕКТ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ В ДИНАМИКЕ НЕСФЕРИЧЕСКОГО ПУЗЫРЬКА**

**Александр А. Аганин, Дмитрий Ю. Топорков**  
Институт механики и машиностроения КНЦ РАН  
2/31, ул. Лобачевского, 420111 Казань, Россия

В последнее время активно обсуждается относительно недавно экспериментально открытое явление ядерного излучения при акустической кавитации (выхода нейтронов и ядер трития при акустическом возбуждении кластера паровых пузырьков в дейтерированном ацетоне, 2002г.) [1]. Согласно [1], для экспериментальной реализации явления ядерного излучения внутри резонатора с жидким дейтерированным ацетоном без пузырьков формируется стоячая волна давления с амплитудой в 15бар в пучности. При такой амплитуде понижение давления до значений, близких к максимальным отрицательным, вызывает в жидкости напряжения, близкие разрывным, так что для возникновения кавитации достаточно лишь незначительного дополнительного возмущения. В экспериментах [1] образование пузырьков происходит от нейтронного источника, который включается в фазе, близкой к максимальному понижению давления в стоячей волне. В момент включения нейтронного источника в жидкости образуются мельчайшие пузырьки размером порядка нескольких нанометров. В фазе отрицатель-

ного давления в жидкости размеры пузырьков многократно увеличиваются и достигают значений порядка миллиметра. Ядерное излучение наблюдается на последующей фазе с положительным давлением, где пузырьки стремительно и очень сильно сжимаются.

По мнению авторов [1], в момент максимального сжатия паровых пузырьков в них возникают состояния вещества с температурами до миллиона градусов, что и вызывает ядерное излучение. Важнейшим условием для этого является сохранение формы пузырька близкой к сферической вплоть до момента максимального сжатия. В настоящей работе изучается изменение малых искажений сферической формы одиночного пузырька в ходе его расширения-сжатия в экспериментальных условиях [1]. Основное внимание уделяется исследованию влияния вязкости окружающей жидкости, поскольку при малых размерах пузырька оно может быть очень значительным. Используется математическая модель, в которой жидкость возле пузырька полагается вязкой несжимаемой, пар в пузырьке – идеальным с однородным распределением давления. Учитываются процессы неравновесных испарения-конденсации и нестационарной теплопроводности в паре и жидкости. Для анализа эффекта вязкости жидкости наряду с точной моделью (модель Просперетти 1977) [2] применяются и некоторые способы приближенного описания ее влияния. В приближенных способах не учитываются эффекты нестационарной диффузии завихренности жидкости.

Изучен характер изменения искажения сферической формы пузырька в ходе его расширения-сжатия. Обнаружена сильная зависимость влияния вязкости жидкости на изменение искажения как от начальных размеров пузырька, так и от фазы колебаний давления жидкости, в которую он образуется. В частности, в момент максимального сжатия пузырька амплитуда искажения его сферической формы может оказаться как больше, так и меньше начальной в десятки и сотни раз. Пренебрежение эффектом вязкости жидкости может приводить к многократному (до 100 раз) завышению значения искажения сферической формы пузырька в момент его максимального сжатия.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта 02-01-00100), в рамках программы фундаментальных исследований РАН (проект «Динамика несферических газовых и паровых пузырьков в жидкости на режимах с сильным и сверхсильным расширением-сжатием») и федеральной целевой программы «Интеграция» (код проекта Б0020).

## References

1. Taleyarkhan R.P., West C.D., Cho J.S., Lahey R.T. (jr), Nigmatulin R.I., Block R.C. Evidence for Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation //Science, 2002, **295**, 1868-1873.
2. Prosperetti A. Viscous effects on perturbed spherical flows //Quarterly of Appl. Math, **34**, 1977, 339-352.

## DYNAMICS OF PARTICLES IN NON-STATIONARY FLOW OF NON-VISCOUS FLUID

**Nataliya G. Aniskina, Irina P. Boriskina, Sergey I. Martynov**

Mordovian State University

68, Bolshevistckaya str., 430000 Saransk, Russia

Method of investigation of problem of hydrodynamic interaction of particles in viscous fluid was developed in [1, 2]. The same method can be used for the obtained solution of the problem of hydrodynamic interaction of particles in potential flow of compressible and incompressible non-viscosity fluid also. The forces exerted on the particles and linear particle velocities are calculated. Since the force exerted on system of particles along the velocity of fluid is equal to zero (D'alambert's paradox) each particle of the system is under non-zero force [3]. That is result of hydrodynamic interaction of the particles. The forces exerted on the each particle were obtained. Result depends on the position of particles relatively the flow velocity. Using these forces dynamic simulation of motion of particles in linear flow of compressible and incompressible fluid were done numerically. A comparison with the results obtained earlier is given.

## References

1. Martynov S.I., 1998, "Hydrodynamic interaction of particles", Fluid Dynamics, V.33: 245-251.
2. Martynov S.I., 2000, "Particle interaction in a flow with a parabolic velocity profile", Fluid Dynamics, V.35:68-73.
3. Седов Л.И. Механика сплошной среды М.: Наука, 1976. Т. 2. – 536с.

## ДИНАМИКА ЧАСТИЦ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ПОТОКЕ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

Наталья Г. Аниськина, Ирина П. Борискина, Сергей И. Мартынов

Мордовский государственный университет  
68, ул. Большевистская, 430000 Саранск, Россия

В работе рассматривается динамика частиц в потенциальном потоке идеальной жидкости с учетом их гидродинамического взаимодействия. Для потенциальных течений жидкости задача сводится к нахождению решения уравнения Лапласа для потенциала, а значит можно использовать метод, разработанный в работах [1-2]. Используя этот метод, моделируется гидродинамическое взаимодействие частиц в нестационарном потоке несжимаемой жидкости, невозмущенная скорость которого представляется в виде полинома первой степени по координатам. Для частиц, расстояние между которыми много меньше характерного размера, на котором проявляется сжимаемость жидкости, аналогичная математическая модель применяется для моделирования гидродинамического взаимодействия частиц в нестационарном потоке сжимаемой жидкости. Предложенные модели позволяют найти распределение скорости и давление в жидкости вокруг частиц и вычислить силы, действующих на частицы со стороны жидкости с учетом их гидродинамического взаимодействия.

Представлены результаты по численному моделированию динамики частиц в нестационарных потоках идеальной жидкости. Как известно, для системы тел в таких потоках должен выполняться парадокс Даламбера, то есть суммарная сила на все тела со стороны жидкости равна нулю вдоль скорости потока. Отличной от нуля может быть только сила перпендикулярная вектору скорости набегающего потока жидкости. Однако, как указывается в [3, с. 75], “при наличии в потоке нескольких тел нельзя утверждать, что составляющая силы воздействия потока, параллельная скорости, для каждого тела в отдельности равна нулю”. Поэтому, учет гидродинамического взаимодействия частиц приводит к появлению отличной от нуля силы, действующей на частицы, которые под действием этой силы приходят в движение. Как показывает численное моделирование, поведение частиц существенно зависит от их первоначального положения относительно потока жидкости.

В зависимости от этого частицы либо стремятся сблизиться вплоть до контакта, либо разойтись на бесконечность.

### Литература

1. Мартынов С.И. Гидродинамическое взаимодействие частиц // Изв. РАН, МЖГ. 1998. № 2. С.112-119.
2. Мартынов С.И. Взаимодействие частиц в течении с параболическим профилем скорости // Изв. РАН, МЖГ. 2000. № 1. С.84-91.
3. Седов Л.И. Механика сплошной среды М.: Наука, 1976. Т. 2. – 536 с.

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE JET FLOWS OF COMPRESSIBLE WATER

**Gennadiy A. Atanov\***, **Alexander N. Semko\*\***

\*Donetsk Open University, 1-a, Artioma str., 83086 Donetsk, Ukraine

\*\*Donetsk National University,

24, Universitetskaya str., 83055 Donetsk, Ukraine

In the paper, results of the systematical investigations of the impulsive jet flows of compressible water are given. Three kinds of problems are considered.

1. The internal ballistics problems devoted to processes of producing the impulsive water jets with the help of the installations: extrusive impulsive jets device, electrical impulsive jets device, hydro-cannon (nonpercussive and percussive, power droved), of hydrodynamic cumulation.

2. The external ballistics problems deal with the motion of the impulsive water jets in the air and under water.

3. Problems about jet-target impact.

Solutions of different optimization problems are given: of the hydro-cannon profile nozzle, of the powder hydro-cannon, of the electrical impulsive jets device.

All the problems were put in the gas dynamic approach as quasi-one-dimensional and axis-symmetrical ones. The optimization problems were solved as variation ones with the general method of the indefinite Lagrange's multipliers. Numerical calculations were carried out in moving grids with the method of characteristics, Godunov's method, and method with artificial viscosity.

## **ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВОДЫ С УЧЕТОМ СЖИМАЕМОСТИ**

**Геннадий А. Атанов\*, Александр Н. Семко\*\***

\*Донецкий открытый университет,

ул. Артёма, 1-а, 83086 Донецк, Украина

\*\*Донецкий национальный университет

24, ул. Университетская, 83055 Донецк, Украина

В докладе приводятся результаты систематических исследований импульсных струйных течений воды с учетом сжимаемости.

Рассматриваются три класса задач.

1. Задачи внутренней баллистики, посвященные процессами генерирования импульсных струй в установках: импульсном водомете, электроим-пульсном водомете, гидропушках (безударного и ударного действия, пороховой), гидродинамической кумуляции.

2. Задачи внешней баллистики, связанные с процессами, сопровождающими движение струи в воздухе и под водой.

3. Задачи об ударе струи о преграду.

Приводятся также решения задач оптимизации сопла гидропушки, пороховых гидропушки и импульсного водомета, электроим-пульсного водомета.

Задачи ставились в газодинамической постановке как квазиод-номерные и осесимметричные. Задачи оптимизации решались как вариационные общим методом неопределенных множителей Лагранжа. Численные расчеты проводились в подвижных сетках методом характеристик, методом Годунова, методом с искусственной вязкостью.

## **PECULIARITIES OF THE MOTION OF THE POWDER HYDRO- CANNON JET IN THE AIR**

**Gennadiy A. Atanov\*, Alexander N. Semko\*\*, Ernest S. Geskin\*\*\***

\*Donetsk Open University, 1-a, Artioma str., 83086 Donetsk, Ukraine

\*\*Donetsk National University,

24, Universitetskaya str., 83055 Donetsk, Ukraine

\*\*\*New Jersey Institute of Thechnology, Newark, USA

The paper deals with investigation of the impulsive water jet being produced by the powder hydro-cannon and moving with speed of 1000-1200 m/s in the air. Dependences of the jet speed and momentum on dis-



tance from the hydro-cannon nozzle are experimentally investigated. The speed measuring was grounded on the interrupting the laser rays by the jet, the jet momentum was measured with the help of a physical pendulum.

It is shown that the stand off distance of the powder hydro-cannon is much more than that of the gas droved hydro-cannon. As this takes place, the jet speed is insignificantly changed being reduced of 15% to the disintegration instant but the jet demolition ability has spent in full. On the base of the shadow photographies, the mechanism of increasing the jet demolition ability is explained. The reason here is losses of mass. Moving with a big supersonic speed, the jet experiences considerable air resistance. It spreads near the its head and takes a mushroom form. A water shroud arises round the jet that is disintegrated easy and took away by the air.

Influence of polymer additions on the jet parameters is studied. It is shown that the additions does not influence on the jet speed value but lead to insignificant increase of the stand off distance. The mechanisms of the phenomena are explained.

## **ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ В ВОЗДУХЕ СТРУИ ПОРОХОВОЙ ГИДРОПУШКИ**

**Геннадий А. Атанов\*, Александр Н. Семко\*\*, Эрнест С. Гескин\*\*\***

\*Донецкий открытый университет,  
ул. Артёма, 1-а, 83086 Донецк, Украина

\*\*Донецкий национальный университет  
24, ул. Университетская, 83055 Донецк, Украина

\*\*\*Нью Джерси технологический институт Ньюарк, США

Доклад посвящен исследованию импульсной струи воды, генерируемой пороховой гидропушкой и движущейся в воздухе со скоростью 1000-1200 м/с. Экспериментально изучалось изменение с расстоянием от сопла гидропушки скорости и импульса струи. Измерение скорости основывалось на прерывании струей лучей лазера, импульс определялся по величине отклонения физического маятника.

Показано, что дальнбойность пороховой гидропушки значительно больше, чем у гидропушки, работающей на сжатом газе, что объясняется особенностями ее конструкции. При этом скорость струи снижается незначительно, уменьшаясь на пути до разрушения струи на величину до 15%, а разрушающая способность струи утрачивается

полностью. На основе анализа теневых фотографий объяснен механизм уменьшения разрушающей способности. Это происходит за счет потери струей массы. Двигаясь с большой сверхзвуковой скоростью, струя испытывает значительное волновое сопротивление. Она растекается в окрестности головной части, под действием встречного потока приобретает грибовидную форму, вокруг струи формируется пелена, которая легко разрушается и уносится.

Изучено влияние полимерных добавок на параметры импульсной струи. Показано, что добавки практически не сказываются на величине скорости струи, но приводят к незначительному увеличению дальности. Объяснены механизмы этих явлений.

## **SEDIMENTATION OF PARTICLES ON THE PLANE**

**Vitaly E. Baranov, Sergey I. Martynov**

Mordovian State University,

68, Bolshevistskaya str., 430000 Saransk, Russia

The influence hydrodynamic interaction of a spherical solid particles moving near the plane is considered in present work. Results can be used as for obtained average velocity of sedimentation of the particles on the wall as for numerical simulation the formation of the structures of the particles in the flow near the plan. The method of the present work is based on the results [1]. The velocity of particles and the flow field of fluid around ones were obtained with a high accuracy. The solution is more precise than can be obtained by reflection method [2].

### **References**

1. Мартынов С.И. Взаимодействие частиц в суспензии. - Казань, 1998.- 135 с.
2. Happel I., Brenner H. Low Reynolds number hydrodynamics. Englewood Giffs: Prentice - Hall, 1965. – 553 p.

## **ОСАЖДЕНИЕ НА ПЛОСКОСТЬ ЧАСТИЦ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ**

**Виталий Е. Баранов, Сергей И. Мартынов**

Мордовский государственный университет

68, ул. Большевистская, 430000 Саранск, Россия

Работа посвящена изучению движения твердой сферической частицы вблизи плоской поверхности в жидкости при малых числах Рейнольдса. Решение этой задачи актуально и позволило бы моделировать образование и движение в вязкой жидкости вблизи плоской поверхности каких-либо структур из частиц, а также влияние на этот процесс различных сил (например, электрических зарядов на частицах). Для решения задачи параметры движения жидкости выражались через частные производные фундаментального решения уравнения Лапласа и тензорные коэффициенты [1]. В результате удалось найти параметры движения частицы и поле скоростей жидкости с большой точностью, увеличивающейся при удалении частицы от плоскости. Применяемый метод решения значительно точнее метода отражений [2], кроме того, в отличие от метода отражений позволяет получить верные решения для случая малых расстояний между частицей и плоскостью (вплоть до касания).

#### **Литература**

1. Мартынов С.И. Взаимодействие частиц в суспензии.- Казань, 1998.- 135с.
2. Happel I., Brenner H. Low Reynolds number hydrodynamics. Englewood Giffs: Prentice - Hall, 1965. – 553 p. Рус. перевод: Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, -1971. –630с.

### **DETERMINATION OF TIP JET CHARACTERISTICS IN THE PROBLEM OF LIQUID WEDGE RUNNING INTO A PLANE**

**Rumiya K. Belkheeva**

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics

15, Lavrentyev Avenu, 630090 Novosibirsk, Russia

The problem of liquid wedge running into a vertical solid wall is considered. This problem is represented as a self-similar one with a free boundary that is reduced to a boundary-value problem in the right-angled triangle situated in the Wagner function plane. Obtained before at infinity and jet tip, asymptotic expansions of the solution have the same structure. The main part of the paper is matching asymptotic expansions of the solution. The dependence of the angle between the free surface and the solid wall on the liquid wedge angle is found; velocity potentials and stream functions are presented.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БРЫЗГОВОЙ СТРУИ  
В ЗАДАЧЕ О НАТЕКАНИИ ЖИДКОГО КЛИНА  
НА ПЛОСКОСТЬ**

**Румия.К. Бельхеева**

Институт Гидродинамики им. Лаврентьева  
15, пр. Лаврентьева, 630090 Новосибирск, Россия

Рассматриваемая задача о натекании жидкого клина на вертикальную твердую стенку представлена как автомодельная задача со свободной границей, которая сводится к краевой задаче в квадрате, расположенном в плоскости функции Вагнера. Найденные ранее асимптотические разложения решения в двух особых точках – в вершине струи и на бесконечности – имеют одинаковую структуру. Основной частью работы является согласование асимптотических разложений решения. Найдена зависимость угла брызговой струи в точке контакта с твердой стенкой от раствора жидкого клина, приведены потенциалы и линии тока поля течения.

**A CAVITATION FLOW MODEL WITH NUCLEATION  
AND BUBBLE DYNAMICS INCORPORATING  
BUBBLE/BUBBLE INTERACTIONS, THERMAL DAMPING  
AND BUBBLE FISSION**

**Can F. Delale**

Istanbul Technical University, 34469 Maslak, Istanbul, Turkey

A cavitation flow model with nucleation and bubble dynamics, which takes into account bubble/bubble interactions, thermal damping and bubble fission by a modified Rayleigh-Plesset equation, is constructed. Nucleation is considered by an improved version of the classical nucleation theory [1], that corrects for the discrepancy between theory and experiments (especially, for water) with reasonable nucleation rates. The bubble/bubble interactions are taken into account in the mean-field theory [2] by introducing a parameter which characterizes the range of influence of interacting bubbles. Thermal damping [3] is considered in the uniform pressure approximation within the bubbles, similar to the work of Nigmatulin et al. [4] and Prosperetti [5]. Energy dissipation in violent bubble collapses due to bubble

fission is taken into account by a simple model [6] that conserves volume during bubble break-up. The cavitation model is then applied to steady and unsteady bubbly cavitating flows with/without nucleation [2, 7]. Thermal damping and bubble fission seem to be the dominant mechanisms of energy dissipation in cavitating flows.

### References

1. C.F.Delale, J.Hruby and F.Marsik, 2003, J. Chem. Phys., 118, pp. 792-906.
2. C.F.Delale, G.H.Schnerr and J.Sauer, 2001, J. Fluid Mech., 427, pp. 167-204.
3. C.F.Delale, 2002, ASME J. Fluids Eng., 124, pp.969-976.
4. R.I.Nigmatulin, N.S.Khabeev and F.B.Nagiev, 1981, Intl. J. Heat Mass Transfer 24, 1033-1044.
5. A.Proseretti, 1991, J.Fluid Mech., 222, pp. 587-616.
6. M.Tunc and C.F.Delale, 2003, Fifth International Symposium on Cavitation, 1-4 November, Osaka, Japan, paper No: Cav03- GS-2-003.
7. C.F.Delale, K.Okita and Y.Matsumoto, 2003, Fifth International Symposium on Cavitation, 1-4 November, Osaka, Japan, Paper No: Cav03-GS-2-001.

## APPLICATION OF POTENTIAL OF THE SIMPLE LAYER IN THE CAVITATION

**Alexander S. Demidov, Alexey G.Terentiev**

Cheboksary's Institute of the Moscow State Open University  
54, Marks str., 428000 Cheboksary, Russia

The potential of a simple layer is covered all-round in many classical works in mathematics, but its application is connected to some difficulties of computing character. Namely, the integrant of a tangent derivative has singularity that complicates numerical calculations. More widespread methods now are the methods based on integral identities of Green and on potential of a vortices layer.

In the present report the numerical algorithm of calculation of a cavitating flow around flat and axisymmetric foils based on a simple layer is offered. The form of a cavity is determined by consecutive approach. Results of numerical calculations coincide to high accuracy with analytical data for sphere and the cylinder. Comparison of numerical results for cavitating flows of flat and axisymmetric bodies executed by different methods is given.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПРОСТОГО СЛОЯ В ТЕОРИИ КАВИТАЦИИ**

**Александр С. Демидов, А.Г. Терентьев**  
Чебоксарский институт МГОУ,  
54, ул. К.Маркса, 428000 Чебоксары, Россия

Потенциал простого слоя освещен всестороннее во многих классических работах по математике, но его применение сопряжено с некоторыми трудностями вычислительного характера. В частности, при вычислении касательной производной подинтегральная функция имеет особенность, что затрудняет численные расчеты. Более распространенными методами в настоящее время являются методы, основанные на интегральных тождествах Грина и на потенциале вихревого слоя.

В настоящем докладе предлагается численный алгоритм расчета плоских и осесимметричных кавитационных течений, основанный на использовании простого слоя. Форма каверны определяется последовательным приближением. Результаты численных расчетов согласуются с высокой точностью с аналитическими данными для сферы и цилиндра. Дано сравнение численных результатов для кавитационного обтекания плоских и осесимметричных тел, выполненных разными методами.

## **CAVITATING FLOW ON THE AXISYMMETRIC BODIES WITH NEGATIVE CAVITATION NUMBERS**

**Nadezhda A.Dimitrieva**  
Chuvash State University  
15 Moskovsky Pr., 428015 Cheboksary, Russia

The theoretical investigate of the cavitating flows with the negative cavitation numbers usually is limit with consideration of Chaplygin – Kolsher scheme [1, 2], in which the stagnation zone over the body is formed and the drag of the “body – cavity” system is equal to zero. At the same time may be to consider the cavitating flow using the Tulin – Terentiev scheme for negative cavitation numbers too, then the drag will be not equal to zero. Such flow on circular cylinder was investigated by author early [3]. In present work the cavitation flow on the sphere in infinite stream of an

ideal incompressible weightless liquid with negative cavitation numbers study with the help of the  $p$ -analytical functions complex variables [4].

#### References

1. Gurevich M.I. Theory of Jets in Ideal Fluid. M.: Nauka. 1979, 536 p. (in Russian).
2. Kojouro L.A. The flow of sphere with tapering areas of constant pressure. Numerical Methods in Solid Medium. Novosibirsk, 1983. V. 14. № 6. Pp. 83 – 88. (in Russian).
3. Dimitrieva N.A., Filippov V.I. The numerical analysis of collocation and iteration methods in cavitation tasks. Hydrodynamics of limited streams. Cheboksary. 1988. Pp. 40 – 46. (in Russian).
4. Dimitrieva N.A., Terentiev A.G. An application of the  $p$ -analytical functions to investigate cavitating flows. Proceedings of International Summer Scientific School “HSH – 2004”. Cheboksary, 2002. Pp. 119 – 126.

## КАВИТАЦИОННОЕ ОБТЕКАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ЧИСЛАМИ КАВИТАЦИИ

Надежда А. Димитриева

Чувашский государственный университет  
15 Московский пр., 428015 Чебоксары, Россия

Теоретическое исследование кавитационного обтекания препятствий с отрицательными числами кавитации обычно ограничивается рассмотрением обтекания по схеме Чаплыгина – Кольшера [1, 2], когда за телом образуется застойная зона и сопротивление системы «тело – каверна» равно нулю. В то же время, моделируя кавитационное течение схемой Тулина – Терентьева, можно рассматривать кавитационное обтекание препятствий и при отрицательных числах кавитации, тогда сопротивление будет отлично от нуля. Автором ранее исследовано такое обтекание кругового цилиндра [3]. В настоящей работе с помощью аппарата теории  $p$ -аналитических функций комплексного переменного [4] исследовано кавитационное обтекание сферы безграничным потоком идеальной невесомой несжимаемой жидкости при отрицательных числах кавитации.

#### Литература

1. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. М.: Наука. 1979. 536 с.

2. Кожуро Л.А. Обтекание сферы с заостренными областями постоянного давления. Численные методы в механике сплошной среды. Новосибирск, 1983. Т. 14. № 6. С. 83 – 88.
3. Димитриева Н.А., Филиппов В.И. Численный анализ методов коллокации и итерации в кавитационных задачах. Гидродинамика ограниченных потоков. Чебоксары, 1988. С. 40 – 46.
4. Dimitrieva N.A., Terentiev A.G. An application of the  $p$ -analytical functions to investigate cavitating flows. Proceedings of International Summer Scientific School “HSH – 2004”. Cheboksary, 2002. Pp. 119 – 126.

## PLANING OF A PLATES SYSTEM WITH GIVEN LOADS

**Stanislav A. Dovgiy, Michael V. Makasyeyev**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

37, Peremohy pr., 03056 Kyiv, Ukraine

The problem about a planing of a flat plate at given load and fixed trim angle is resolved in paper [1]. The feature of this problem is that the characteristic linear size, on which one is calculated a Froude number, is determined, as against the theory L.I.Sedov, not on wetted length, and as  $L = \sqrt[3]{\Delta / \rho g}$ , where  $\Delta$  - weight of a planing craft,  $\rho g$  - specific gravity of water. Wetted length thus is searched from the solution to the problem. In paper [2] other problem is resolved, in which one trim angle is not fixed any more, but the center of gravity position concerning a trailing edge of a plates presets. Thus the angle of lean is free and is set depending on a Froude number. The obtained predicted data on immersing of a stern, mid-ship and nose of a hydroplane depending on a Froude number completely correspond to the known charts G.E.Pavlenko for flyboats.

The success in the solution of the indicated problems has allowed to formulate and find solution to the series of problems for a planing system having actual physical sense and large practical significance. In particular, the theoretical substantiation of a principle of recovery of energy of surface waves is obtained at planing of a surface system formulated for the first time by academician of an Academy of sciences of Ukraine G.E.Pavlenko. The principle is that the part of energy loiter maiden planing surface on creation of a wake can be used by the second surface at its exact arrangement concerning a wave.

In the paper the problems about a planing of a system of bound and irrelevant plates a tandem are presented. The bound system can model mo-



tion of a hydroplane on planing steps. Thus the total loading at a system and center of gravity position concerning a trailing edge of the second plate is set. Influencing geometrical parameters on hydrodynamic characteristics of a system is investigated.

The case of existence of a cavern in space between planing steps is esteemed, and the cavern can be both ventilated, and natural. At a planing of independent laminas the Froude number is determined on some reference load, for example, on maximum, or on mean. The center of gravity position is set on each plate.

The method of singular integral equations is used. The numerical solution is implemented by a method of discrete vortexes. The definition of wetted lengths of planing plates represents a non-linear problem, for solving which the algorithm of multidimensional search by Nelder and Mead is used.

### References

1. Dovgiy S.A., Efremov I.I., Makasyeyev M.V. Some problems of a planing theory // High speed hydrodynamics / Proc. of Int. Summer Scientific School. June 16—23, 2002. Cheboksary, Russia. – Comput. Public.: Cheboksary, Russia / Washington, USA. – 2002. – Pp. 241—248.
2. Makasyeyev M.V. A steady planing of a plates on a surface of a powerful liquid at given load and free trim angle // Applied Hydromechanics. 2003, vol. 5 (77), № 2. Pp. 73–75.

## ГЛИССИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПЛАСТИН С ЗАДАНЫМИ НАГРУЗКАМИ

**Станислав А. Довгий, Михаил В. Макасеев**

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт"

37, Проспект Победы, 03056 Киев, Украина

В работе [1] решена задача о глиссировании плоской пластины при заданной нагрузке и фиксированном угле наклона. Особенность этой задачи заключается в том, что характерный линейный размер, по которому вычисляется число Фруда, определяется, в отличие от теории Л.И.Седова, не по смоченной длине, а как  $L = \sqrt[3]{\Delta / \rho g}$ , где  $\Delta$  - нагрузка,  $\rho g$  - удельный вес воды. Смоченная длина при этом ищется

из решения задачи. В работе [2] решена другая задача, в которой угол хода уже не фиксирован, но задано положение центра тяжести относительно задней кромки глссера. При этом угол хода свободен и устанавливается в зависимости от числа Фруда. Полученные расчетные данные по погружению кормы, миделя и носа глссера в зависимости от числа Фруда полностью соответствуют известным диаграммам Г.Е.Павленко для быстроходных судов.

Успех в решении указанных задач позволил сформулировать и решить для системы глссирующих пластин ряд задач, имеющих реальный физический смысл и большое практическое значение. В частности, получено теоретическое обоснование принципа регенерации энергии поверхностных волн при глссировании системы поверхностей, сформулированного впервые академиком Академии Наук Украины Г.Е.Павленко. Принцип заключается в том, что часть энергии, затраченной первой глссирующей поверхностью на создание волнового следа, может использоваться второй поверхностью при правильном ее расположении относительно волны.

В докладе рассмотрены задачи о глссировании системы связанных и не связанных пластин тандем. Связанная система может моделировать движение глссера на реданах. При этом задается суммарная нагрузка на систему и положение центра тяжести относительно задней кромки второй пластины. Исследуется влияние геометрических параметров на гидродинамические характеристики системы.

Рассматривается случай существования каверны в пространстве между реданами, причем каверна может быть как вентилируемой, так и естественной. При глссировании независимых пластин число Фруда определяется по некоторой характерной нагрузке, например, по максимальной или средней. Положение центра тяжести задается на каждой пластине.

Используется метод сингулярных интегральных уравнений, численное решение осуществляется методом дискретных вихрей. Определение смоченных длин глссирующих пластин представляет собой нелинейную задачу, для решения которой применяется алгоритм многомерного поиска по Нелдеру и Миду.

#### **Литература**

1. Dovgiy S.A., Efremov I.I., Makasyeyev M.V. Some problems of a planing theory // High speed hydrodynamics / Proc. of Int. Summer Scientific School. June 16—23, 2002. Cheboksary, Russia. – Comput. Public.: Cheboksary, Russia / Washington, USA. – 2002. – Pp. 241—248.

2. Макасеев М.В. Установившееся глссирование пластины по поверхности весомой жидкости при заданной нагрузке и свободном угле хода // Прикладная гидромеханика. 2003, том 5(77), №2. С. 73-75.

## **SOME NEW RESULTS OF THE LINEAR THEORY OF PLANNING ON A HEAVY FLUID SURFACE.**

**Ion I. Efremov**

Kuban State University

149, Stavropolskaya street, 350040 Krasnodar, Russia

It is considered the task of a planning of a plate in L.I.Sedova's statement. Expression for a flow function, obtained by L.I.Sedov, is used for a conclusion of an integral equation concerning pressure of a fluid on the moistened part of a plate. The constructed equation is compared to the equations obtained earlier. For an evaluation of a kernel function of an integral equation as an Fourier integral it is offered the effective technique with passage to an integration on a imaginary axis of a complex plane.

There are obtained numerical results for hydrodynamic characteristics of a plate with the known moistened length. Also there are obtained new formulas for evaluation of a lift coefficient and the moment which approximate numerical data in all a range of a modification of a Froude number.

It is offered the simple technique of definition of the unknown moistened length of a planning plate using a method of secants for a solution of the nonlinear equations.

## **НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ ГЛССИРОВАНИЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТЯЖЕЛОЙ ЖИДКОСТИ.**

**Ион И. Ефремов**

Кубанский Государственный Университет,

149, Ставропольская улица, 350040 Краснодар, Россия

Рассматривается задача глссирования пластинки в постановке Л.И.Седова. Выражение для функции тока, полученное Л.И.Седовым, используется для вывода интегрального уравнения относительно давления жидкости на смоченную часть пластинки. Построенное уравнение сравнивается с уравнениями, полученными ранее. Для вычисле-

ния ядра интегрального уравнения в виде интеграла Фурье предложена эффективная методика с переходом к интегрированию по мнимой оси комплексной плоскости.

Получены численные результаты для гидродинамических характеристик пластинки с заданной смоченной длиной. Выведены новые формулы для вычисления коэффициента подъемной силы и момента, которые аппроксимируют численные результаты во всем диапазоне изменения числа Фруда.

Предложена простая методика определения неизвестной смоченной длины глассирующей пластинки, основанная на использовании метода секущих решения нелинейных уравнений.

## **METHOD OF THE SOLUTION OF LINEAR NON-STATIONARY HYDROAERODYNAMICS PROBLEMS BY REDUCTION TO STATIONARY PROBLEMS**

**Ion I. Efremov, Elena P. Lukashchik**

Kuban State University

149, Stavropolskaya str., 350040 Krasnodar, Russia

The method is based on representation of kernel functions of integral equations of hydroaerodynamics of thin profile and wing as a Fourier integrals. The integral equation of a non-stationary problem is replaced with an integral equation of a corresponding stationary problem with the changed right part (vertical velocity) with addition of a unknown constant (for a profile) or the unknown function dependent on a variable along span in case of a wing. Unknown values of a constant or a function are determined from a condition of satisfaction of the constructed solution to an initial integral equation in any point of a profile or on required set of points along span.

Efficiency of the offered method is tested on new construction of a known exact solution of a non-stationary problem about oscillations of a thin section in unlimited flow and obtaining of the approximate numerical solution of a problem about oscillations of a rectangular wing.

**МЕТОД РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ  
ГИДРОАЭРОДИНАМИКИ СВЕДЕНИЕМ  
К СТАЦИОНАРНЫМ ЗАДАЧАМ**

**Ион И. Ефремов, Елена П. Лукашик**

Кубанский Государственный Университет,  
149, Ставропольская улица, 350040 Краснодар, Россия

Метод основан на представлении ядер интегральных уравнений гидроаэродинамики тонких профилей и крыльев в виде интеграла Фурье. Интегральное уравнение нестационарной задачи заменяется интегральным уравнением соответствующей стационарной задачи с измененной правой частью (вертикальной скоростью) с добавлением неизвестной константы (для профиля) или неизвестной функции, зависящей от переменной вдоль размаха в случае крыла. Неизвестные значения константы или функции определяются из условия удовлетворения сконструированного решения исходному интегральному уравнению в какой-либо точке профиля или на требуемом множестве точек вдоль размаха.

Эффективность предложенного метода опробована на новом построении известного точного решения нестационарной задачи о колебаниях тонкого профиля в безграничном потоке и получении приближенного численного решения задачи о колебаниях прямоугольного крыла.

**VARIATIONAL INVERSE BOUNDARY-VALUE PROBLEMS  
AND AIRFOIL SHAPE OPTIMISATION**

**Alexander M. Elizarov, Nikolay B. P'inskiy**

Chebotarev Institute of Mathematics and Mechanics  
of Kazan State University

17, Universitetskaya Str., 420008 Kazan, Russia

We use the term «variation inverse boundary-value problems» (VIBVP) to denote a class of boundary-value problems with free boundaries, where both the solution of partial differential equation and the domain  $D$  where the solution is determined are unknown. Moreover only one condition is prescribed on the boundary  $\partial D$  of the domain. The extremal prop-

erty of the domain is the requirement of maximization (minimization) of a given functional  $J$  (usually under additional constraints). According to the formulation these problems belong to the class of the optimal shape design problems (see e. g. [1, 2]) and the presence of the additional restrictions may significantly affect the solvability of the problems. Therefore it is necessary to determine which functionals can be used and which additional restrictions can be imposed. It is difficult to answer the questions from only general considerations.

At the present time there is no special theory of the VIBVP. From one side this is explained by the fact that the functional  $J$  must express some extremal properties of the unknown domain and the extremal function to be found. It means that for a correct formulation of the problem it is necessary to prescribe beforehand the class of both unknown objects. Thus the analysis of the solvability of the VIBVP depends on the choice of  $J$ . Moreover additional restrictions may significantly affect the correctness of the formulation. Therefore it is necessary to determine which functional it is reasonable to consider and what additional restrictions can be imposed. The general answers for these questions are rather difficult. From the other side the VIBVP according to their formulation belong to the optimal shape design problems. For these problems the theory of correctness is already developed in the terms of the functional  $J$ . In this case for the problem solvability the additional constraints must provide the compactness (or some similar property) of the set of functions where the functional  $J$  is determined. The uniqueness of the solution is not guaranteed. So far the only source of the VIBVP are the theories describing certain natural phenomena (e. g. fluid or gas flows) and the choice of the optimized functional and additional restrictions is determined by the physical sense of the processes and phenomena modeled by the variational problem. One of these theories is the classical aerodynamics.

Problems of determination of body shapes with extremal hydrodynamic or aerodynamic characteristics in an incompressible or a gas flow appeared at the very beginning of the development of modern aerodynamics. Traditional approach to the aerodynamic optimization is based on solution of direct boundary value problems. For example for the case of 2D flows the approach can be realized as follows: some multi-parametrical class of airfoil contours is determined, for every airfoil from this class direct calculation is performed to determine the aerodynamic characteristics, and optimization of the airfoil contour is performed by a proper choice of free parameters with the account of several restrictions. This approach al-

lows finding an optimal airfoil in a given multi-parametrical class. However, the approach requires special methods for the contour representation; due to arbitrary changes of the contour the constraints of the problem can be violated. Moreover with this approach we cannot write explicitly the optimized functional, and solution of the direct problem is rather time consuming. There are some results known where these problems are solved numerically for 3D cases and for complex mathematical models of flow.

One of the classical optimization problems of aerodynamics is the problem of determination of a wing profile providing maximum lift. Interest to this problem, first exposed in the works of N. E. Zhukovsky and S. A. Chaplygin, is still remained and the history of this question includes many works that have already become classical. Nevertheless for the modern aerodynamics several modifications of the problem of maximization of the lift are still of practical interest.

In the present paper the basic approaches used for solving of the mentioned problem are described. The approaches are based on the theory of inverse boundary value problems of aerohydrodynamics [3]. Several formulations and methods of solution for VIBVP in the framework of classical models of fluid dynamics under isoparametrical constraints are discussed. Methods for deriving functionals, which express the lift for different flow topologies, are described. Extremal solution of the functional is found. Upper estimates for the maximal value of dimensionless velocity circulation for the class of airfoils with smooth contours of given length in an incompressible ideal flow under several restrictions on theoretical angle of attack and maximal velocity on the airfoil are obtained.

This work was supported by Russian Foundation for Basic Researches, projects 02-01-00061, 03-01-00015.

### References

1. *Pironneau O.* Optimal shape design for elliptic systems. – New York: Springer, Springer Lecture Notes in Computational Physics, 1984. – 168 p.
2. *Haslinger J., Neittaanmaki P.* Finite element approximation for optimal shape design: theory and application. – New York: John Wiley and sons Ltd., 1988. – 335 p.
3. *Elizarov A. M., Il'inskiy N. B., Potashev A. V.* Mathematical methods of airfoils design. Inverse boundary-value problems of aerohydrodynamics. – Berlin: Wiley-VCH, 1997. – 292 p.

## **ВАРИАЦИОННЫЕ ОБРАТНЫЕ КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ И ОПТИМИЗАЦИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ФОРМ**

**Александр М. Елизаров, Николай Б. Ильинский**

НИИ математики и механики им. Н. Г. Чеботарева

Казанского государственного университета

17, ул. Университетская, 420008 Казань, Россия.

Для обозначения класса краевых задач, в которых искомыми являются как решение дифференциального уравнения в частных производных (в частности, аналитическая функция), так и сама область его определения, когда последняя обладает некоторым экстремальным свойством, будем использовать термин «вариационные обратные краевые задачи (ВОКЗ)». Как и в классических прямых краевых задачах, на границе области задается одно краевое условие. Вместе с тем сама граница является искомым элементом решения, и поэтому такие задачи примыкают к широкому классу краевых задач с неизвестными границами. В качестве второго краевого условия на неизвестной границе выступает экстремальное свойство искомой области, выраженное в виде требования максимизации (минимизации) заданного функционала  $J$  (возможно, при дополнительных ограничениях).

К настоящему времени специальная теория ВОКЗ не создана. С одной стороны, это объясняется тем, что в силу самой постановки этих задач функционал  $J$  должен выражать некоторое экстремальное свойство как искомой области, так и искомой функции, и поэтому для корректности задачи необходимо заранее зафиксировать классы искомым объектов. Значит, анализ картины разрешимости ВОКЗ будет непосредственно связан с выбором класса функционалов  $J$ , причем наличие или отсутствие дополнительных ограничений может существенно изменить эту картину. Поэтому нужно определить, какие функционалы целесообразно рассматривать и какие дополнительные ограничения нужно привлекать. Из общих соображений ответы на эти вопросы найти затруднительно. С другой стороны, ВОКЗ по самой своей постановке относятся к задачам оптимального проектирования (см., например, [1, 2]), для которых теория разрешимости на языке свойств функционалов  $J$  уже построена. При этом роль дополнительных ограничений сводится к обеспечению компактности (или некоторого аналога этого свойства) множества определения  $J$ , а единственность решения, вообще говоря, не гарантируется. Вместе с тем, естествен-



ным источником ВОКЗ являются теории, связанные с описанием природных явлений (например, течений жидкости или газа), причем выбор оптимизируемых функционалов и дополнительных ограничений определяется физическим смыслом тех процессов и явлений, которые моделирует вариационная задача. Одной из таких теорий является классическая аэрогидродинамика.

Задачи нахождения формы тел, имеющих экстремальные гидродинамические или аэродинамические характеристики при обтекании жидкостью или газом, возникли с самого начала развития аэрогидродинамики и как чисто теоретические, и как важные для приложений проблемы. Традиционный подход к аэродинамической оптимизации базируется на решении прямых краевых задач. Например, для случая плоских течений он заключается в следующем: для модификации исходного контура задают некоторое многопараметрическое семейство контуров; для каждого профиля, ограниченного таким контуром, рассчитывают аэродинамические характеристики, а их оптимизацию проводят за счет выбора значений свободных параметров в уравнении контура при различных ограничениях. Такой подход позволяет найти оптимальный профиль в фиксированном многопараметрическом классе, но требует в свою очередь специальных способов перебора контуров заданного семейства, так как при произвольном изменении значений управляющих параметров могут нарушиться введенные ограничения. Кроме того, при таком подходе не удастся в явном виде записать оптимизируемые функционалы, а последовательное решение прямых задач требует применения методов численной оптимизации и значительных затрат вычислительных средств. Известны результаты в этом направлении для пространственного случая и достаточно сложных математических моделей течений.

Одной из классических оптимизационных задач аэрогидродинамики является задача определения формы профиля крыла самолета, обладающего максимальной подъемной силой. Интерес к этой проблеме, проявленный еще в начале 20-го столетия в работах Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина, сохраняется до сих пор, а история ее исследования включает работы многих авторов, ставшие классическими. Тем не менее, для современной аэродинамики различные модификации задачи максимизации подъемной силы крылового профиля остаются актуальными.

В настоящей работе описаны основные подходы, применяемые для решения названной задачи и базирующиеся на теории обратных

краевых задач аэрогидродинамики [3]. Обсуждены постановки и методы решения ВОКЗ аэрогидродинамики в рамках классических моделей механики жидкости и газа при изопериметрических ограничениях. Описаны способы построения функционалов, выражающих подъемную силу при различных схемах обтекания, найдены экстремали. Даны оценки максимальной безразмерной циркуляции скорости в классе гладких замкнутых непроницаемых контуров фиксированного периметра, обтекаемых потоком идеальной несжимаемой жидкости, при дополнительных ограничениях на максимальную величину скорости на контуре и теоретический угол атаки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 02-01-00061, 03-01-00015), программы «Университеты России» (проект УР 04.01.009) и Фонда НИОКР Республики Татарстан.

#### Литература

1. *Pironneau O.* Optimal shape design for elliptic systems. – New York: Springer, Springer Lecture Notes in Computational Physics, 1984. – 168 p.
2. *Haslinger J., Neittaanmaki P.* Finite element approximation for optimal shape design: theory and application. – New York: John Wiley and sons Ltd., 1988. – 335 p.
3. *Elizarov A. M., Il'inskiy N. B., Potashev A. V.* Mathematical methods of airfoils design. Inverse boundary-value problems of aerohydrodynamics. – Berlin: Wiley-VCH, 1997. – 292 p.

## MODELLING OF THE WATER COOLING PROCESS IN THE COOLING TOWERS

**Vladimir L. Fedyaev, Alexander B. Mazo,**

**Boris A. Snigerev, Irina V. Morenko**

Institute of Mechanics and Engineering of Kazan Science Center of  
Russian Academy of Sciences,  
2/31, Lobachevsky str., 420111 Kazan, Russia

The cooling towers are widespread in the energetics, chemical and metallurgical works and the like. In a cooling towers water is cooled by air. On the whole the air moved by a fan, is brought in close contact with water. The main part of heat transfer is achieved by evaporation of some of the

circulating water, a smaller part by convection of the warm water to the colder air. The main devices of the cooling towers are the fan, drift eliminator, water distribution system and fill.

In this work a closed mathematical description of the air motion, drops flight, cooling water process is proposed.

The results of calculation of the pressure, speeds, temperature fields, drops trajectory are given and the heat efficiency of the cooling tower is estimated. The dependencies for estimation of coefficients of mass transfer are presented.

On the basis of the investigations done the recommendations on reconstruction of the considered cooling towers have been worked out.

## **О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВОДЫ В ГРАДИРНЯХ**

**Владимир Л. Федяев, Александр Б. Мазо,  
Борис А. Снигерев, Ирина В. Моренко**

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра  
Российской академии наук,  
2/31, ул. Лобачевского, 420111 Казань, Россия

Градири широко применяются в энергетике, на предприятиях химии, нефтехимии, металлургии, других отраслей промышленности. В градирнях оборотная вода охлаждается атмосферным воздухом. В основном воздух продувается через градирню вентилятором, непосредственно контактируя с водой. Большая часть тепла передается воздуху испарением, меньшая часть за счет конвекции от теплой воды к охлаждающему воздуху. Основными устройствами градирни являются вентилятор, каплеуловитель, система распределения воды и ороситель.

В настоящей работе предлагается замкнутое математическое описание движения воздуха, полета капель, процессов охлаждения воды в градирнях.

Приводятся результаты расчетов полей давлений, скоростей, температур, траекторий капель. Оценивается тепловой к.п.д. градирни. Теоретические данные дополняются экспериментальными. Представляются зависимости для оценки коэффициента массоотдачи.

На основе проведенных исследований вырабатываются рекомендации по модернизации рассматриваемых градирен.

# PLANING HYDROFOIL WITH SPOILER UNDER GRAVITY: LINEARIZED THEORY AND ASYMPTOTIC APPROACH

**Gregory M. Fridman**

St.Petersburg State Technical Marine University  
3, Lotsmanskaya str., 190008 St.Petersburg, Russia

The paper addresses itself to a free-surface lifting flow problem of two-dimensional irrotational flow past a planing hydrofoil with spoiler mounted on its trailing edge under gravity. The matched asymptotic technique is used to account for the influence of the regions in the edges vicinity where the perturbations are not small. Two approaches are used in the outer domain far from the edges: analytical method developed by L.I. Sedov and numerical approach introduced by E.O. Tuck. Numerical results are obtained for pressure distribution, hydrodynamic coefficients and flow patterns for various ranges of parameters. In the vicinities of leading and trailing edges nonlinear solutions are derived to be matched with the outer one.

Two figures below demonstrate flow pattern around the planing arc of a parabola  $y(x) = -\alpha x + 2h(1 - x^2)$ ,  $x \in [-1; 1]$  without and with the spoiler of the relative length  $\varepsilon$  at its trailing edge at point  $x = 1$ . The following flow parameters are chosen: the Froude number  $Fr=1$ ;  $h/\alpha = 0.25$ ;  $\varepsilon/\alpha = 1$ . It is assumed that the flow far before the hydrofoil is given by the potential  $w(z) = (A_1 + iA_2) \exp(i v \bar{z})$  and  $A_1 = A_2 = \alpha$ .

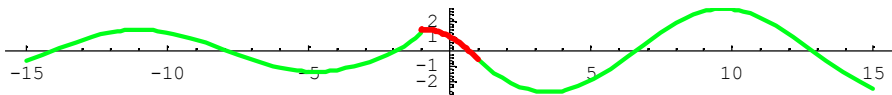


Figure 1: Flow pattern for a planing parabola arc without spoiler.

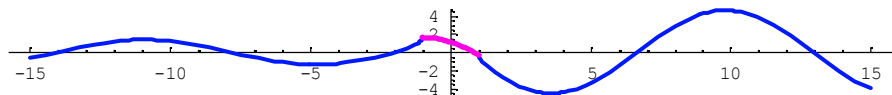


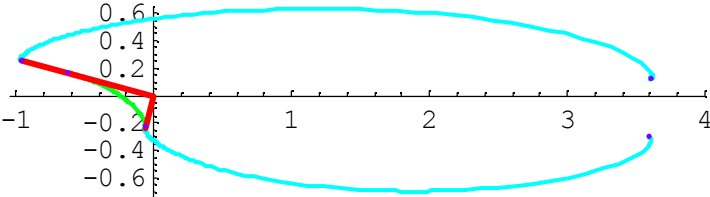
Figure 2: Flow pattern for a planing parabola arc with spoiler at the trailing edge.

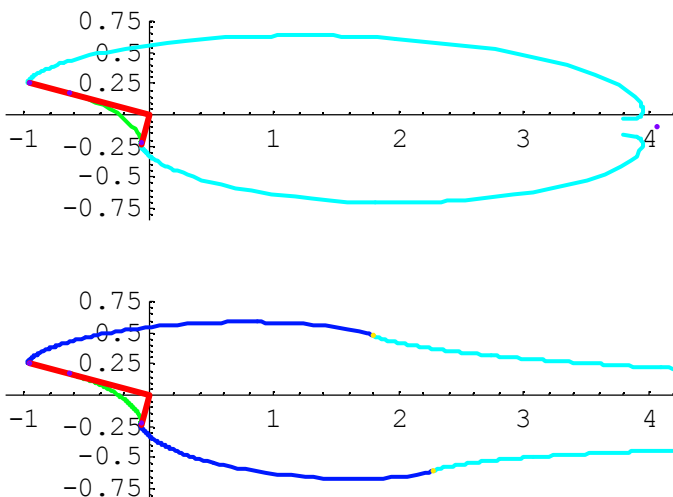
# CAVITATING HYDROFOIL WITH STAGNATION ZONE IN THE SPOILER VICINITY: A VARIETY OF CAVITY CLOSURE SCHEMES

**Gregory M. Fridman and Alexander K. Uryadov**  
St.Petersburg State Technical Marine University  
3, Lotsmanskaya str., 190008 St. Petersburg, Russia

The paper presents an analytical solution and corresponding numerical results for the nonlinear problem of the flow past a cavitating flat plate with stagnation zone in the spoiler vicinity. Three cavity closure models are analysed: Tulin-Terentev single-vortex scheme, Gilbarg-Efros scheme with re-entrant jet and so called second Tulin's scheme with double-vortex termination. In all three cases the flow region is mapped into the one and the same rectangular on auxiliary plane. With the correspondence between the physical plane and auxiliary quadrant the Chaplygin method enables one to write down three corresponding exact solutions each in the form of two derivatives of the complex potential with respect to physical and auxiliary variables, the elliptic theta-functions technique being adopted.

Systematic numerical analysis is performed not only for the force coefficient but also for flow patterns including the contour of the stagnation zone (see pictures below for all three schemes; angle of attack is 15 deg; cavitation number 0.65; spoiler length 0.25 and stagnation zone length 0.65). Numerical data obtained for  $C_L$  and  $C_D$  versus the length of the stagnation zone demonstrate a minimum of the hydrodynamic coefficients to exist in all the considered cases. It is numerically verified that the length of the stagnation zone corresponding to these minimums ensure Brillouin's condition of smooth detachment to be satisfied. A new expression is proposed for the force coefficient in the case of the Tulin-Terentev cavity closure scheme generalizing a well-known formula for the drag coefficient.





## **TWO-DIMENSIONAL MODEL of A POTENTIAL FLOW ABOUT the BODY with BLOWING ON ITS SURFACE**

**Vladimir A. Frolov**

Samara State Aerospace University

34 Moscovskoe shosse, 443086 Samara, Russia

The paper presents a solution for problem about flow of a body with blowing on its surface. It is supposed that both the fluid in which the body moves and the blowing fluid are homogeneous and identical. The potential model of flow of an ideal fluid is used. Compressibility of flow is taken into account by a method described in works of the author [1, 2].

Statement of a problem is reduced to the solution of Laplace equation with boundary conditions at infinity and on surface of the body. For the solution of problem, the numerical panel method with distributed sources on boundary elements is used. Boundary conditions are satisfied in control points (points of collocations), which are taken in the middle of each panel. In control points at the surface of the body where there is no blowing, boundary conditions of zero normal velocity is satisfied, and at the part of the surface where blowing takes place, local speed of flow is equal to blowing velocity. Such statement of problem results in a system of linear algebraic equations in which unknown variables are intensity of the

distributed sources. The matrix of aerodynamic influence has dense structure with prevalence of values on the main diagonal. The effective method for the solution of the system is a method of factorization ( $LU$ -decomposition), as for the prescribed geometry of a body it is possible to receive solution for various modes of blowing, decomposing a matrix of aerodynamic influence on the top and bottom triangular matrixes only once. On the obtained values of intensities of the distributed sources the components of velocity in any point of computational domain, including border are calculated.

For display of a picture of flow about bodies, the method of integration of the differential equation for streamlines is used. Integration is carried out with Euler's first order method. The "hypothesis of streamlines stabilization", underlying a method of the account of compressibility, allows to build a picture of flow only for incompressible flow, as for compressible flow the streamlines will coincide with streamlines of an incompressible flow. In the paper pictures of the flow about elliptic profiles with blowing on their surface are presented.

In Fig. 1 streamlines are resulted at a flow of elliptic 10% profile with velocity of blowing in mid-section in 5 times exceeding velocity of flow on infinity.

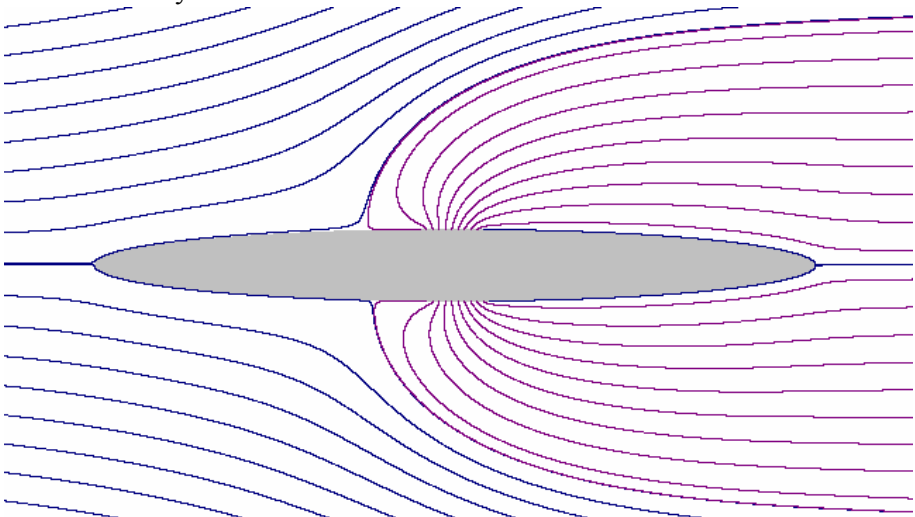


Fig. 1: The flow about elliptic 10 % profile with blowing

Variable parameters of a problem are: geometry of a body, an arrangement of places of blowing, value and direction of blowing velocity.

Pressure distribution at the surface of a body is calculated based on the Bernoulli equation for an incompressible fluid. For compressible flow, pressure distribution is recalculated basing on fluid properties and Mach number [2]. Integration of pressure distribution at the surface of a body allows defining forces and the moments affecting on a body.

### References

1. Frolov V. A. High-speed flows of the compressible fluid around two circle contours with a pair of symmetric vortices //Proceedings of International Summer Scientific School High Speed Hydrodynamics, June 16-23, 2002, Cheboksary, Russia, Computational Publications, Cheboksary, Russia/Washington, USA, 2002. – P.331-338.
2. Frolov V. A. High-speed compressible flows about axisymmetric bodies //Proceedings of Fifth International Symposium on Cavitation (Cav2003), Osaka, Japan, November 1-4, 2003, CD-ROM: Cav03-OS-7-004. – P.1-9.

## **ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ ОКОЛО ТЕЛА С ВДУВОМ ЖИДКОСТИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ**

**Владимир А. Фролов**

Самарский государственный аэрокосмический университет  
34, Московское шоссе, 443086 Самара, Россия

Рассматривается задача об обтекании тела при наличии вдува жидкости на его поверхности. Предполагается, что среда, в которой движется тело, и вытекающая жидкость однородные и одинаковые. Используется потенциальная модель течения идеальной жидкости. Сжимаемость течения учитывается методом, описанным в работах автора [1,2].

Постановка задачи сводится к решению уравнения Лапласа с граничными условиями на бесконечности и на поверхности тела. Для решения поставленной задачи используется численный панельный метод с размещением на граничных элементах распределенных источников. Граничные условия удовлетворяются в контрольных точках (точках коллокаций), которые выбираются на середине каждой панели. В контрольных точках на поверхности тела, где отсутствует вдув, выполняются условия непротекания (равенства нулю нормальной компоненты полной скорости течения), а на границе контура, где име-



ет место вытекание жидкости, выполняются условия равенства местной скорости течения заданной скорости вдува. Такая постановка задачи приводит к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), в которой неизвестными являются интенсивности распределенных источников. Матрица аэродинамического влияния имеет плотную структуру с преобладанием значений на главной диагонали. Решение СЛАУ экономично выполнять методом факторизации ( $LU$ -разложение), поскольку для заданной геометрии тела можно получать решения для различных режимов вдува жидкости, разложив матрицу аэродинамического влияния на верхнюю и нижнюю треугольные матрицы только один раз. По полученным значениям интенсивностей распределенных источников вычисляются компоненты скорости в любой точке рабочей области, включая границу.

Для отображения картины течения около тел используется метод интегрирования дифференциального уравнения для линии тока. Интегрирование выполняется по схеме Эйлера первого порядка. Гипотеза стабилизации линий тока, лежащая в основе метода учета сжимаемости, позволяет строить картину течения только для несжимаемого течения, поскольку для сжимаемого течения линии тока будут совпадать с линиями тока для несжимаемого потока. В работе приводятся картины обтекания эллиптических профилей с вдувом жидкости на их поверхностях.

На рис.1 приведены линии тока при обтекании эллиптического 10% профиля со скоростью вдува жидкости в миделевом сечении в 5 раз превышающей скорость течения на бесконечности.

Изменяемыми параметрами задачи являются: геометрия тела, расположение мест вытекания жидкости, значение и направление скорости вдува. Распределение давление по поверхности тела вычисляется на основании уравнения Бернулли для струйки тока несжимаемого газа. Для сжимаемого течения распределение давления пересчитывается по параметрам жидкости и числу Маха [2]. Интегрирование распределения давления по поверхности тела позволяет определить силы и моменты, действующие на тело.

# FLOW ABOUT THE RECTILINEAR FOIL HAVING A SOURCE & RUN-OFF BY FREE LIQUID SUR- FACE

**Anatolij V. Galanin, Oleg V. Ilyin**

Chuvash State University, 15 Moskovsky Pr., 428015 Cheboksary,  
Russia

Problems connected with flow about foils having a source (a run-off) of the surface have been studied in a number of papers. A problem of flow about a rectilinear foil having a source & a run-off of the same intensity by the free stream of liquid is considered in the given paper. Particular solving of this problem is followed by solving of the problem connected with flow about a plate having a source & run-off by free surface of infinitely deep liquid.

Solution of the problem is within the rectangle plane which displays the area of flow with section along the curve 1-4 (2-3) (Fig .1).

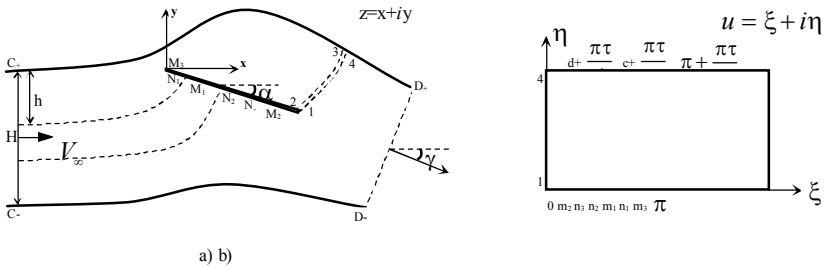


Fig.1

Variable form of solution of a kinematical problem looks as follows:

$$\frac{dW}{dz} = V_\infty \cdot e^{i\alpha} \frac{\prod_{i=1}^3 \mathfrak{G}_1(u - n_i) \mathfrak{G}_4(u - m_i)}{\prod_{i=1}^3 \mathfrak{G}_4(u - n_i) \mathfrak{G}_1(u - m_i)},$$

$$\frac{dW}{du} = \frac{Q}{\pi} \left\{ \frac{d}{du} \ln \mathfrak{G}_1(u - m_2) \mathfrak{G}_1(u - m_2 - \frac{1}{2} \pi \tau) - \frac{d}{du} \ln \mathfrak{G}_1(u - m_1) \mathfrak{G}_1(u - m_1 - \frac{1}{2} \pi \tau) \right\} +$$

$$+V_{\infty} \frac{H}{\pi} \left\{ \frac{d}{du} \ln \mathfrak{G}_4 \left( u - c - \frac{1}{4} \pi \tau \right) \mathfrak{G}_4 \left( u - c + \frac{1}{4} \pi \tau \right) - \frac{d}{du} \ln \mathfrak{G}_4 \left( u - d - \frac{1}{4} \pi \tau \right) \mathfrak{G}_4 \left( u - d + \frac{1}{4} \pi \tau \right) \right\} + K, \quad (1)$$

where  $K$  – is a real constant.

The solution includes 11 variables:

$n_1, n_2, n_3, m_1, m_2, m_3, c, d, K, q = e^{-\pi|\tau|}$  &  $Q$ . There are 10 conditions to determine them:

- doubly periodicity of the function  $\frac{dW}{du}$  :

$$n_1 + n_2 + n_3 = m_1 + m_2 + m_3 + c + d \quad (2)$$

- uniqueness of the representing function:  $z(0) = z(\pi)$ ; (3)

- assignment of the rate in the infinity:  $\frac{dW}{dz} \left( c + \frac{1}{4} \pi \tau \right) = V_{\infty}$ ; (4)

- vanishing of  $\frac{dW}{du}$  in the critical points & in the convergence point

of the flow:

$$\frac{dW}{du} (n_1) = \frac{dW}{du} (n_2) = \frac{dW}{du} (n_3) = \frac{dW}{du} (0) = 0; \quad (5)$$

- the length of the plate  $l$ , the immersion depth of the plate in the flow  $h$  & the width of the flow on the left-side in the infinity: :

$$z(\pi) - z(m_3) = l e^{-i\alpha},$$

$$\operatorname{Im} \left[ W(0) - W \left( \frac{1}{4} \pi \tau \right) \right] = h V_{\infty}, \quad \pi i \cdot \operatorname{res} \left( \frac{dz}{du} \left( c + \frac{1}{4} \pi \tau \right) \right) = H. \quad (6)$$

Lift factor of the plate in the flow is defined by the next formula

$$C_y = \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 l} = 2 \frac{H}{l} \sin \gamma, \quad (7)$$

where  $\gamma$  is the angle of the wash such that

$$\gamma = -2 \sum_{i=1}^3 \left( \arg \mathfrak{G}_4 \left( d - n_i + \frac{1}{4} \pi \tau \right) - \arg \mathfrak{G}_4 \left( d - m_i + \frac{1}{4} \pi \tau \right) \right) + 2 \sum_{i=1}^3 \left( \arg \mathfrak{G}_4 \left( c - n_i + \frac{1}{4} \pi \tau \right) - \arg \mathfrak{G}_4 \left( c - m_i + \frac{1}{4} \pi \tau \right) \right). \quad (8)$$

Solution of the problem for the plate under free surface of infinitely – deep liquid can be got from the given above solution by passage to the limit  $H \rightarrow \infty$ ,  $c - d \rightarrow 0$ , where  $|H(c - d)| \leq M < \infty$ .

## ОБТЕКАНИЕ ПОД СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖИДКОСТИ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ПРОФИЛЯ С ИСТОЧНИКОМ И СТОКОМ

Анатолий В. Галанин, Олег В. Ильин

Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова  
15, Московский пр., 428015 Чебоксары, Россия

В ряде работ изучались задачи обтекания профилей с источником (стоком) на их поверхности. В данной работе рассматривается задача обтекания прямолинейного профиля с источником и стоком одинаковой интенсивности свободной струей жидкости. Из решения этой задачи в частном случае следует решение задачи обтекания пластины с источником-стоком под свободной поверхностью бесконечно глубокой жидкости.

Решение задачи ищется в плоскости прямоугольника, на который отображается область течения с разрезом вдоль кривой 1-4 (2-3) (Fig .1)

В параметрическом виде решение кинематической задачи имеет вид (1), где  $K$  – действительная постоянная.

В решение входит 11 параметров:

$n_1, n_2, n_3, m_1, m_2, m_3, c, d, K, q = e^{-\pi|\tau|}$  и  $Q$ . Для их определения имеем

10 следующих условий

- двояко-периодичность функции (2);

- однозначность отображающей функции (3);

- задание скорости на бесконечности (4);

- обращение в нуль  $\frac{dW}{du}$  в критических точках и точке схода по-

тока (5);

- считаются заданными длина пластины  $l$ , глубина погружения пластины в струе  $h$  и ширина струи на бесконечности слева (6).

Коэффициент подъемной силы пластины в струе определяется формулой (7), где  $\gamma$  - угол скоса потока вычисляется по формуле (8).

Из приведенного выше решения путем предельного перехода  $H \rightarrow \infty, c - d \rightarrow 0$ , при  $|H(c - d)| \leq M < \infty$  можно получить решение задачи для пластины под свободной поверхностью бесконечно-глубокой жидкости.

## **HIGH-SPEED MOTION IN BUBBLY FLOW: COMMENTS ON DRAG**

**John R. Grant, Ivan N. Kirschner, James S. Uhlman**

Engineering Technology Center, Applied Mechanics Department  
One Corporate Place, Middletown, RI 02842-6277 USA

The present paper is devoted to a continuing analysis of high-speed motion through a liquid containing bubbles. As is well known, the presence of gas in a liquid tends to reduce the sound speed, and even small concentrations of gas have a dramatic effect. For example, for air in water at standard atmospheric conditions, even a concentration of 1% reduces the sound speed to only approximately 120m/s from its value of approximately 1500m/s in the pure liquid. Moreover, if the finite radii of the bubbles are taken into account, the sound speed is frequency dependent.

Grant and Kirschner (2003) recognized the similarity of the problem of high-speed motion in such a mixture to Kelvin's problem for a ship wake, where the wave speed is also frequency dependent. They further presented a formulation for predicting the wave patterns that can be expected in axisymmetric flow and developed the equivalent of Green's function for the potential due to a source in the bubbly mixture.

In the current paper, this line of development has been continued to consider the wave drag acting on an object moving at high speed in a bubbly flow. Predictions are made comparing the drag on a given object in an air-water mixture to the drag on the same object at an arbitrary supersonic speed in pure water. These results are presented for various values of the void fraction, the bubble radius, and the velocity of an object of fixed approximate size. The importance of these results is that wave drag due to supersonic effects is predicted to occur at significantly lower speeds in a bubbly mixture than would be the case in the pure liquid.

### **References**

Grant, J.R., and I.N. Kirschner (2003) "High-Speed Motion in Bubbly Flows," Cav03-GS-4-006, Proceedings of the Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003), Osaka, Japan.

## **COMPUTATION OF VORTEX MOTION OF LIQUID IN NON-SPHERICAL BUBBLE DYNAMICS**

**Renata K. Gubaidullina\*, Nailya A. Khismatullina\*\***

\*Institute of Mechanics and Engineering of Kazan Science Center of  
Russian Academy of Sciences,

2/31, Lobachevsky str., 420111 Kazan, Russia

\*\*Kazan State Pedagogical University,

1, Mezhlauk str., 420021 Kazan, Russia

In paper [1] A. Prosperetti proposed a method which describes liquid viscosity influence on nonspherical oscillations of a gas bubble in a liquid. At small distortions of the spherical shape of the bubble this method is equivalent to the description of viscosity influence by Navier-Stokes equations. However till recently the method [1] has been used rather rarely. Various approximate methods in which unsteady character of vorticity diffusion is neglected were used instead and they gave satisfactory results which may be accounted for large size of bubbles under consideration. The discovery of the stable periodic single bubble sonoluminescence in a standing acoustic wave in 1990 [2] and its active investigation stimulated research of surface distortion of bubbles the size of which is much less than that of the bubbles considered earlier. Along with this, accurate description of viscosity effect became significantly more important since influence of the liquid viscosity increases as bubble's size decreases. It is shown in [3] that simplified methods of describing viscosity effect may lead to results noticeably different from what is obtained by using the way [1]. The difference can be not only quantitative but qualitative at the same time. According to the way [1], the description of the liquid viscosity effect is a partial differential equation with an integral boundary condition. Therefore, the use of this way involves application of numerical methods for joint solution of the ordinary differential equation for the distortion of the spherical shape of the bubble and the partial differential equation describing the liquid vorticity. From the computational point of view, the numerical procedure of solving the liquid vorticity equation is much more expensive. Therefore, the efficiency of such a numerical procedure is very important.

In the present work the efficiency of two methods of computation of vortex motion of liquid during non-spherical oscillations of a single gas bubble is studied. Regimes of oscillations with large bubble volume changes around those typical of periodic single bubble sonoluminescence are considered. Implicit scheme of the finite difference method and the col-

location method with Chebyshev polynomials of even order as basis functions are investigated. The efficiency of the liquid vorticity computation is analyzed using problems of three kinds: (a) without taking into account heat conduction in both the gas and the liquid, (b) with taking into account heat conduction in the gas only, (c) with taking into account heat conduction in both the gas and the liquid. In all the cases the bubble oscillations are excited by harmonic variation of the pressure in the liquid. The heat conduction in the gas and the liquid is governed by the partial differential equations in temperature. Both methods considered in this study reduce all the partial differential equations (for the liquid vorticity and the temperature in the gas and the liquid) to the ordinary differential equations in time. The ordinary differential equations are solved by Dorman-Prince algorithm which is a kind of Runge-Kutta method of high order of accuracy with automatic choice of the time step.

Comparative analysis of the efficiency of two methods of the liquid vorticity computation during non-spherical single gas bubble oscillations performed in the present work has shown that for most of the problems considered the finite difference method is more preferable.

This work was supported in part by the Russian Foundation of Basic Research (project 02-01-00100), the Program of Basic Research of the RAS (project "Dynamics of non-spherical gas and vapor bubbles in a liquid under strong and super-strong enlargement-compression") and the Federal Target Program "Integration" (project B0020).

### References

1. Prosperetti A. Viscous effects on perturbed spherical flows //Quart. Appl. Math, 34,1977. P.339-352.
2. Gaitan D.F., Crum L.A., Church C.C. and Roy R.A. Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable cavitation bubble //JASA, 91, 1992. P.3166–3183.
3. Roberts P.H., Wu C.C. The decay of bubble oscillations //Phys. Fluids, 10, 1998. P.3227-3229.
4. Hairer E., Nörsett S.P., Wanner G. Solving ordinary differential equations I. Nonstiff problems. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio.

## **РАСЧЕТ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ДИНАМИКЕ НЕСФЕРИЧЕСКОГО ПУЗЫРЬКА**

**Рената К. Губайдуллина\*, Наиля А. Хисматуллина\*\***

\* Институт механики и машиностроения Казанского научного центра  
Российской академии наук,

2/31, ул. Лобачевского, 420111 г. Казань, Россия

\*\*Казанский государственный педагогический университет  
1, ул. М. Межлаука, 420021 Казань, Россия

В работе [1] А. Просперетти предложил способ описания влияния вязкости жидкости на несферические колебания пузырька газа в жидкости, являющийся при малых искажениях сферической формы пузырька эквивалентным описанию этого эффекта уравнениями Навье-Стокса. Однако до недавнего времени способ [1] практически не использовался. Удовлетворительные результаты удавалось получить при различных приближенных способах, в которых нестационарный характер диффузии завихренности не учитывался. Это, по-видимому, объясняется относительно большими размерами рассматриваемых пузырьков. Открытие явления устойчивой периодической сонолюминесценции отдельного пузырька [2] активизировало изучение искажений сферической формы микронных пузырьков, размеры которых гораздо меньше размеров ранее рассматриваемых пузырьков. Наряду с этим, возросло внимание к точности описания эффекта вязкости жидкости, так как с уменьшением размеров пузырька влияние вязкости увеличивается. В работе [3] показано, что упрощенные способы описания влияния вязкости жидкости могут приводить к результатам, значительно отличающимся от результатов, получаемых с применением способа [1]. При этом отличия могут быть не только количественными, но и качественными. В математическом плане описание эффекта вязкости жидкости согласно способу [1] представляет собой уравнение в частных производных с интегральным граничным условием. Поэтому применение этого способа связано с использованием численных методов для совместного решения обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего искажение сферической поверхности пузырька, и уравнения в частных производных, описывающего поле завихренности жидкости. При этом определение поля завихренности жидкости является с точки зрения компьютерного времени значительно более затратным, так что для его нахождения следует использовать максимально экономичные способы.



В настоящей работе в рамках способа [1] изучается эффективность двух методов расчета вихревого движения жидкости при несферических колебаниях одиночных пузырьков газа в жидкости. Рассматриваются режимы с большими изменениями объема пузырька, характерными для периодической однопузырьковой сонолюминесценции и превышающими их. Исследуются метод конечных разностей с использованием неявной схемы и метод коллокаций с использованием полиномов Чебышева четных порядков в качестве базисных функций. Экономичность расчета завихренности жидкости анализируется в задачах трех видов: (а) без учета теплопроводности и жидкости, и газа, (б) с учетом теплопроводности только газа и (с) с учетом теплопроводности и газа, и жидкости. Во всех случаях колебания пузырька происходят под действием гармонического изменения давления окружающей жидкости. Теплопроводность и газа, и жидкости описывается уравнениями в частных производных относительно температуры. Применение обоих рассматриваемых методов сводит решение уравнений в частных производных для завихренности и температуры в газе и жидкости к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Эта система интегрируется по времени методом Дормана-Принса [4], относящимся к классу методов Рунге-Кутты высокого порядка точности с автоматическим выбором шага интегрирования. Сравнительный анализ двух методов показал, что в большинстве рассмотренных задач применение методики, основанной на методе конечных разностей, является по затратам компьютерного времени более предпочтительным.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта 02-01-00100), в рамках программы фундаментальных исследований РАН (проект «Динамика несферических газовых и паровых пузырьков в жидкости на режимах с сильным и сверхсильным расширением-сжатием») и федеральной целевой программы «Интеграция» (код проекта Б0020).

### Литература

1. Prosperetti A. Viscous effects on perturbed spherical flows // *Quart. Appl. Math.*, 1977, 34. P.339-352.
2. Gaitan D.F., Crum L.A., Church C.C. and Roy R.A. Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable cavitation bubble // *JASA*, 1992. 91. P.3166–3183.
3. Roberts P.H., Wu C.C. The decay of bubble oscillations // *Phys. Fluids*, 1998, 10. P.3227-3229.
4. Хайрер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. М.: Мир, 1990. 512с.

# **USING OF HYDRODYNAMIC MODELS TO ESTIMATE ACCURACY OF UNIVARIATE SOLUTION FOR NON-STATIONARY ELECTROCHEMICAL FORMING TASK**

**Anton V. Gutsunaev, Airat R. Urakov**

The State Aviation Technical University of Ufa, Russia  
12, K. Marx st., Ufa 450000, Russia

The electrochemical-forming problem means the searching of anode border shapes that are obtained due to dissolving by electric current.

The process of dissolving is nonstationary, but there are some well-known stationary cases as a result of electrode tool uniform motion. The way of solving the task in one-dimensional case is known well too. Here we do not take into account the influence of treated surface form in a full measure, because we assume that dissolving rate is defined by the distance between the material and the electrode-tool only. But this solution is so simple and easy that can be used for scoping and assessment calculations.

We have to solve the plain task to estimate the error of the one-dimensional solution. Here we can use methods of theory complex variable functions and a quasistationary approximation. In this case the current density in the chosen anodic border points is calculated at each time step. Further on a time step is made in these points, a new border form is made over new points and current density calculation is made again. The solution of the task by this pure numeric way requires tremendous calculations, has bad convergence, low precision and the solution can be obtained for rather smooth surfaces only.

First of all we can use the fact that the nonstationary process tends to a self-similar process if the latter exists for given conditions of the task. Particular while using one-dimensional solution we assume that any nonstationary forming by a plane electrode always trends to a self-similar process.

The self-similar electrochemical-forming task can be solved by analytic transformations. To do that, we turn to hydrodynamic task with similar boundary conditions. It becomes possible because of the fact that the boundary condition of self-similar electrochemical machining task is similar to the boundary condition of a task where a perfect liquid flows around a circular arc. Using of the hydrodynamic model allows changing pure numerical solution to numerical-analytical solution. Moreover the hydrodynamic model makes an analytical solution in some special cases possible.

The hydrodynamic model simplifies the obtaining of the results considerably and lets us get high accuracy of solution easily. That is why, it is desirable to use appropriate hydrodynamic model instead of pure numerical solution in practical calculations of the electrochemical machining tasks.

To test that the nonstationary process converges to the self-similar process, algorithm of numerical solution was modified in order to decrease the quantity of required calculations and to increase the set of tasks that can be solved. Modification involves mapping of unknown changing anode border on the fixed border in the form of a circular arc. Conformal mapping of inter-electrode space on physical plane onto half-disc is made by the spline. For obtaining anodic border surface points in the process of dissolving, the boundary task of defining of surface coordinates time partial derivatives is solved numerically. For these purposes spline is used too. The solution must satisfy boundary condition of a special form, connecting time partial derivatives of coordinates with partial derivatives by the parameter, defining the position of the point on the circle. Boundary condition is obtained from differential expression of Faraday's law.

The paper gives the comparison of the results obtained by the one-dimensional solution with solutions obtained by the given methods.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

**Антон В. Гуцунаев, Айрат Р. Ураков**

Уфимский государственный авиационный технический университет  
12, ул.К.Маркса, Уфа 450000, Россия

Задача электрохимической размерной обработки состоит в поиске формы анодной границы, образующейся в ходе ее растворения под воздействием электрического тока.

Процесс растворения нестационарный, но хорошо известны стационарные случаи, связанные с равномерным движением электрода-инструмента. Хорошо известен способ решения данной задачи в одномерной постановке, в котором не учитывается в полной мере влияние формы обрабатываемого материала, так как предполагается, что скорость растворения определяется расстоянием между материалом и

инструментом. Тем не менее, такое решение настолько просто и удобно, что хотелось бы использовать его для быстрых предварительных и оценочных расчетов.

Для того, что бы оценить погрешности такого допущения, необходимо решить нестационарную задачу в двумерной постановке. Это делается с использованием методов ТФКП, при этом используется квазистационарное приближение, когда на каждом шаге рассчитывается плотность тока в выбранных точках анодной границы. Далее в этих точках делается шаг по времени, по новым точкам строится новая форма границы и снова выполняется расчет плотности тока. Как показывает практика, такой чисто численный способ для нашей оценки использовать невозможно, так как он требует громоздких вычислений, плохо сходится, имеет низкую точность и может быть получен только на достаточно гладких границах.

Прежде всего, можно использовать тот факт, что нестационарный процесс сходится с соответствующему автомодельному, если последний существует для заданных условий растворения. В частности, допущения одномерного процесса предполагают, что любой процесс формообразования плоским электродом сходится к тривиальному автомодельному случаю.

Для решения двумерной задачи электрохимического растворения посредством аналитических преобразований можно перейти к гидродинамической задаче со сходными граничными условиями. Переход становится возможным из-за того, что краевое условие автомодельного электрохимического растворения сходно с краевым условием обтекания потоком идеальной жидкости дуги окружности.

Применение гидродинамической модели позволяет перейти от чисто численного решения к численно-аналитическому решению, а в некоторых частных случаях получить аналитическое решение задачи. Гидродинамическая модель существенно упрощает получение результатов и позволяет легко достичь высокой точности решения.

Для оценки нестационарных решений в тех случаях, когда автомодельного решения не существует, алгоритм численного решения был модифицирован, таким образом, чтобы уменьшить объем требуемых вычислений и расширить класс решаемых задач. Модификация заключается в том, что неизвестная, изменяющаяся анодная граница в электрохимической задаче отображается на фиксированную границу в виде дуги окружности. Конформное отображение областей, соответствующих межэлектродному пространству, осуществляется с помо-

щью сплайна. Для определения сдвига точек поверхности анодной границы при растворении численно решается краевая задача об определении частных производных координат поверхности по времени. Для этих целей также используется сплайн. Решение должно удовлетворять краевому условию специального вида, связывающему частные производные координат по времени с частными производными по параметру, определяющему положение точки на окружности. Краевое условие получено из дифференциального выражения закона Фарадея.

В сообщении приводится сравнение результатов решения задачи нестационарного электрохимического формообразования в одномерной постановке, с результатами, полученными с помощью предложенных методов.

## **AN EFFICIENCY OF DEPOSITION OF AEROSOL PARTICLES IN THE IMPACTOR WITH PIT ON THE IMPACTION SURFACE**

**Werner Hollander, Dmitri V. Maklakov,  
Shamil K. Zaripov**

\*Chebotarev Institute of Mathematics and Mechanics,  
Kazan State University

17, Universitetskaya Str., 420008 Kazan, Russia

\*\*Fraunhofer Institut Toxikologie und Experimentelle Medizin  
Nikolai-Fuchs-Str. 1, D-30625, Hannover, Germany

A mathematical model of an aerosol flow in a rectangular impactor with pit on the impaction surface is proposed. To avoid the bounce of particles in jet impactors the impaction plate is usually smeared with liquid. The smeared liquid can be kept by means of pits of small depth. The pits influence the process of particle deposition. To find the optimal depth and horizontal sizes of pits it is important to study the impaction efficiency of a single stage in the presence of the pit. The plane jet flowing out of a slot nozzle spreads sideways over the plate that contains a rectangular pit. The modeling of the aerosol flow is reduced to the solution of two problems, namely, determining the carrier-phase velocity field and calculating the particle trajectories in this field. The carrier phase flow is modeled as a plane potential flow of an incompressible fluid. The analytical solution for the complex conjugate velocity of fluid was obtained. Once the fluid flow

is obtained then the particle paths can be traced by numerical integrating the equations of motion of particles. For ease of integrating the equations of motion are transformed to the variables in the parametrical plane. The limiting trajectory that separates the impacted particles from those that are not impacted is found numerically. The impactor efficiency was calculated as Stokes number function for different depths and lengths of the pit. In the presence of the pit the efficiency curves smear out and the value of Stokes number at the 50% efficiency ( $St_{50\%}$ ) decreases with increase of pit depth to some value that is approximately equal to the half-width of the input nozzle. Further growth of the pit depth leads to the increase of  $St_{50\%}$ . Two effects influence deposition of aerosol particles in the impactor with pit. The impaction surface increases for in-depth pits due to the pit side increase and it affects on the pit collection capacity. On the other hand as the depth increases the flow recirculation causes decrease of particle deposition. Because of this, there is a minimal value  $St_{50\%}$  that depends also on the pit length.

Authors gratefully acknowledge support of this work by Russian Foundation for Basic Research for support (grant number N 02-01-00836).

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ИМПАКТОРЕ С УГЛУБЛЕНИЕМ**

**Шамиль Х. Зарипов<sup>\*</sup>, Дмитрий В. Маклаков<sup>\*</sup>, Вернер Холландер<sup>\*\*</sup>**

<sup>\*</sup> НИИ математики и механики им. Н. Г. Чеботарева  
Казанского государственного университета,

17, ул. Университетская, 420008 Казань, Россия.

<sup>\*\*</sup> Fraunhofer Institut Toxikologie und Experimentelle Medizin  
Nikolai-Fuchs-Str. 1, D-30625, Hannover, Germany

Предложена математическая модель течения аэрозоля в струйном импакторе, улавливающая поверхность которого содержит углубление прямоугольной формы. Подобные углубления могут использоваться для удержания от растекания жидкости, которой смазывают импактируемую плоскость с целью предотвращения отскока частиц. Наличие углубления меняет картину течения в отдельной ступени импактора и влияет на процесс осаждения аэрозольных частиц. Струя, вытекающая из щелевого сопла с отрывом, растекается по бесконеч-

ной плоскости, содержащей прямоугольное углубление. Моделирование течения аэрозоля сводится к решению двух задач: определению поля скоростей газа и расчету траекторий частиц в найденном поле. Несущая среда моделируется потенциальным течением идеальной несжимаемой жидкости. Записывается аналитическое решение для комплексно-сопряженной скорости. Для удобства интегрирования уравнения движения частиц преобразуются к переменным в параметрической плоскости. Рассчитаны предельные траектории частиц, разделяющие поток импактируемых частиц от частиц, проходящих в следующую ступень импактора. Построены кривые эффективности осаждения частиц в зависимости от числа Стокса для различных значений глубины и ширины выемки. Кривые эффективности осаждения становятся более пологими и число Стокса  $St_{50\%}$ , соответствующее 50% эффективности осаждения частиц, уменьшается, с ростом глубины выемки до некоторого значения равного примерно полуширине входного сопла. Дальнейшее увеличение глубины приводит к росту  $St_{50\%}$ . Два основных механизма влияет на процесс осаждения частиц в импакторе с углублением. С увеличением глубины выемки растет поверхность импакции за счет боковой стенки, и, следовательно, возрастает эффективность захвата частиц. Вместе с тем при больших глубинах увеличивается вынос частиц из выемки за счет обратного потока, и поэтому, существует минимальное значение  $St_{50\%}$ , зависящее от ширины углубления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект N 02-01-00836).

## **COMPUTING EXPERIMENTS RESULTS IN OPTIMIZATION PROBLEMS FOR HYDRODYNAMICAL PROFILES WITH MAXIMUM VELOCITY LIMITATION**

**Anisa N. Ihsanova**

Chebotarev Research Institute of Mathematic and Mechanic,  
Kazan State University,  
17, Universitetskaya str., Kazan 420008, Tatarstan, Russia

A 2-D optimal hydrodynamic problems are solved. In these problems the form of an impermeable profile was found where the restriction on the

maximal value of velocity on its contour exists. As the optimized characteristic the lift coefficient or the aerodynamic quality were considered. The approach of solution is based on the theory of variational inverse boundary-value problems (see, for example, [1]).

Numerical realization was performed by penalty function method and by method based on Kuhn-Tucker equations (see, for example, [2]). Computing experiments has shown, that more effective is the second method, because in penalty function method the choice of penalty coefficient essentially influences to the result of optimization. The received numerical solution for a smooth contour were compared with exact solution, constructed in [3] for this case. The conducted comparisons were shown good accuracy of coincidences of results.

Numerous computing experiments are conducted and forms of the optimized profile are constructed. For verification of results in package Fluent 6.0. The direct problem of calculation of a flow of the optimized forms in Navier-Stokes models is numerically solved. These calculations, in a case of indefinitely thin trailing edge, were confirmed non-separation character of a flow and obtained hydrodynamic characteristics coincided with optimization results.

I express profound gratitude to professors Elizarov A.M. and Fokin D.A. for the help in work.

This work was supported by Russian Foundation for Basic Researches, project 03-01-00015, programs «Universities of Russia» (the project UR 04.01.0009) and by NIOKR found of Tatarstan Republic.

### References

1. *Elizarov A.M.* Variational inverse boundary-value problems and their applications// Works of the Mathematical center of N.I.Lobachevsky. V.3. Variational inverse boundary-value problems and their applications. – Kazan: UNIPRESS, 1999. – P. 26 - 43. (in Russian).
2. *Aoki M.* Introduction in methods of optimization. M. - Nauka, 1977, - 344 p. (in Russian).
3. *Elizarov A.M., Fokin D.A.* About the exact solution of a problem of construction of a profile of the maximal lift force at limitation on a maximum of velocity on its contour // Na rubege vekov. Chebotarev research institute of mathematics and mechanics of Kazan State University. 1998 - 2002 - Kazan: Izd. Kazan Mathematical association, 2003. - P. 200-212. (in Russian).



# **РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ С ОГРАНИЧЕНИЕМ НА МАКСИМУМ СКОРОСТИ**

**Аниса Н. Ихсанова**

НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева  
Казанского государственного университета  
17 ул. Университетская, 420008 Казань, Татарстан, Россия

Решены плоские оптимизационные гидродинамические задачи, в которых отыскивалась форма непроницаемого профиля при наличии ограничения на максимальное значение скорости на его контуре, а в качестве оптимизируемой характеристики рассматривались коэффициент подъемной силы или аэродинамическое качество. Подход к решению базируется на теории вариационных обратных краевых задач (см., например, [1]).

Численная реализация проводилась методом штрафных функций и методом, основанным на уравнениях Куна-Таккера (см., например, [2]). Вычислительные эксперименты показали, что более эффективным является второй метод, поскольку в методе штрафных функций выбор коэффициента штрафа существенно влияет на результат оптимизации. Полученные численные решения для гладкого контура сравнивались с точными решениями, построенными в [3] для этого случая. Проведенные сравнения показали хорошую точность совпадения результатов.

Проведены многочисленные вычислительные эксперименты и построены формы оптимизированных профилей. Для верификации результатов в пакете Fluent 6.0. численно решена прямая задача расчета обтекания оптимизированных форм по модели Навье-Стокса. В случае бесконечно тонкой задней кромки эти расчеты подтвердили безотрывный характер обтекания, а полученные гидродинамические характеристики совпали с расчетными при оптимизации.

Выражаю глубокую благодарность профессорам Елизарову А.М. и Фокину Д.А. за помощь в работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 03-01-00015), программы «Университеты России» (проект УР 04.01.0009) и Фонда НИОКР Республики Татарстан.

## Литература

1. *Елизаров А.М.* Вариационные обратные краевые задачи и их приложения// Труды Математического центра им. Н.И. Лобачевского. Т.3. Краевые задачи и их приложения. – Казань: УНИПРЕСС, 1999. – С. 26-43.
2. *Аоки М.* Введение в методы оптимизации. М. – Наука, 1977, – 344 с.
3. *Елизаров А.М., Фокин Д.А.* О точном решении задачи построения профиля максимальной подъемной силы при ограничении на максимум скорости на его контуре// На рубеже веков. Научно-исследовательский институт математики и механики им. Н.Г. Чеботарева Казанского государственного университета. 1998 – 2002 г. – Казань: Изд-во Казан. матем. об-ва, 2003. – С. 200-212.

## PROBLEM OF CLASSIC AIRFOILS MODIFICATION FOR IMPROVING AEROHYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS

**Nikolay B. Il'inskiy, Olga S. Neberova**

Chebotarev Research Institute of Mathematic and Mechanic,  
Kazan State University

17, Universitetskaya str., Kazan 420008, Tatarstan, Russia

The actual problem of aerohydrodynamic is the find of optimal shapes of airfoils. Another interesting problem is a problem of modification of classic airfoils for improving their aerohydrodynamic characteristics.

The main idea of this problem is in solving of the direct problems of the aerohydrodynamic calculation of well-known classic airfoils (Zhukovskiy airfoils, Clark airfoils, NACA airfoils and etc. [1,2]) and velocity distributions on the contours of their airfoils are being found as the function of arc length. Then, using methods of solving inverse boundary-value problems and hydrodynamically reasonable velocity distribution ([e.g. [3]), ways of modification of initial data of the inverse boundary-value problem for finding of shapes of airfoils with improved characteristics. Requirements to modified airfoils conditions of the flow without separation, static stability and zero-moment are posed.

Algorithms are developed, the program of solving corresponding problems is made, the numerical results and their analyses are shown.

The present research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (N 02-01-00061) and by NIOKR fund of Republic of Tatarstan.

### References

1. *Ushakov B.A., Krasil'shikov P.P., Volkov A.K., Gregor'evskiy A.M.* The atlas of aerohydrodynamic characteristics of airfoils. – Izd. BNT NKAP of TSAGI, 1940. – 340p.
2. *Eppler R.* Airfoil design and data. – Berlin: Springer-Verlag, 1990. – 562p.
3. *Elizarov A.M., Il'inskiy N.B., Potashev A.V.* Mathematical methods of airfoils design (inverse boundary-value problems of aerohydrodynamic). – Berlin: Akademie Verlag, 1997. – 292p.

## МОДИФИКАЦИЯ КЛАССИЧЕСКИХ КРЫЛОВЫХ ПРОФИЛЕЙ С ЦЕЛЮ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

**Николай Б. Ильинский, Ольга С. Неберова**

НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева

Казанского государственного университета

17 ул. Университетская, 420008 Казань, Татарстан, Россия

Нахождение оптимальных форм высококонесущих крыловых профилей остается актуальной проблемой аэрогидродинамики. При этом интересной является задача модификации классических крыловых профилей с целью улучшения их аэрогидродинамических и геометрических характеристик.

Суть задачи заключается в следующем. Вначале решаются прямые задачи аэрогидродинамического расчета известных классических профилей (профиля Жуковского, профилей серий Clark, NASA и др. [1,2]) и находятся распределения скоростей по контурам этих профилей как функции дуговой абсциссы контура. Далее, основываясь на методах решения обратных краевых задач аэрогидродинамики (ОКЗА) и гидродинамически целесообразных распределений скорости (см., напр., [3]), предлагаются подходы к модификации исходных данных ОКЗА для нахождения формы крыловых профилей с улучшенными характеристиками. В качестве требований к модифицированным профилям выдвигаются условия безотрывности обтекания, условия ста-

тической устойчивости по углу атаки и условие безмоментности искомого профиля.

Разработаны алгоритмы, составлена программа решения соответствующих задач, приведены результаты расчетов и их анализ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 02-01-00061) и Фонда НИОКР Республики Татарстан.

### Литература

1. Ушаков Б.А., Красильщиков П.П., Волков А.К., Грегоржевский А.М. Атлас аэродинамических характеристик профилей крыльев. – Изд. БНТ НКАП при ЦАГИ, 1940. – 340с.

2. Eppler R. Airfoil design and data. – Berlin: Springer-Verlag, 1990. – 562p.

3. Елизаров А.М., Ильинский Н.Б., Поташев А.В. Обратные краевые задачи аэродинамики. М.: Наука, 1994. – 440с.

## THE PROBLEM OF DESIGN OF AN AIRFOIL OF A WING WITH AILERON IN FLOW WITH SEPARATION

**Nikolay B. Il'inskiy, Ludmila G. Plotnikova**

Chebotarev Research Institute of Mathematic and Mechanic,  
Kazan State University  
17, Universitetskaya str., Kazan 420008, Tatarstan, Russia

The problem of construction of an airfoil with aileron without flow separation was investigated. The form of an airfoil of a wing with aileron is found by velocity distribution  $v(s)$  ( $s$  is arc length of a contour), received by modification of velocity distribution of flow around a plate with flap. The flow around a plate with flap is calculated using Wu scheme with adding an isobaric area. For the solution of this problem the auxiliary area (top half plane) is introduces, and in this area the mixed boundary-value problem for analytical function  $\chi = i \ln(dw/V_0 dz)$  is solved. As a result of solution a velocity distribution is found and it is modified. The essence of velocity distribution modification on a plate with flap consists in elimination of infinite velocity in a leading edge of the plate caused by used model of an ideal incompressible fluid.

On the modified velocity distribution the inverse problem of design an airfoil of a wing with aileron with a separation area. Solvability condi-

tions are found using quasisolution methods of inverse boundary-value problem of aerohydrodynamics [1]. As a mathematical model of flow with separation the model of viscous-nonviscous interaction [2] is used.

Results of numerical calculations and their analysis are given.

The present research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (№ 02-01-00061), Department of education of Russian Federation and by NIOKR fund of Republic of Tatarstan.

### References

1. *Elizarov A.M., Il'inskiy N.B., Potashev A.V.* Mathematical methods of airfoils design (inverse boundary-value problems of aerohydrodynamics). Berlin: Academie Verlag, 1997. 292 p.

2. *Gogish L.V., Stepanov G.Y.* Turbulent flows with separation. – M.: Nauka, 1979. 368 p.

## ЗАДАЧА ПОСТРОЕНИЯ ПРОФИЛЯ КРЫЛА С ЭЛЕРОНОМ ПРИ ОТРЫВНОМ ОБТЕКАНИИ

**Николай Б. Ильинский, Людмила Г. Плотникова**

НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева

Казанского государственного университета

17 ул. Университетская, 420008 Казань, Татарстан, Россия

Исследуется задача построения профиля крыла с элероном, обтекаемого отрывным потоком. Форма профиля крыла с элероном находится по распределению скорости  $v(s)$  ( $s$  – дуговая абсцисса контура), полученному путем модификации распределения скорости при обтекании пластинки со щитком. Обтекание пластинки со щитком рассчитывается по схеме Ву с дополнением изобарической области. Для решения этой задачи вводится вспомогательная область – верхняя полуплоскость, и в этой области решается смешанная краевая задача для аналитической функции  $\chi = i \ln(dw/V_0 dz)$ . В результате ее решения находится распределение скорости на всем контуре, которое модифицируется. Суть модификации скорости по пластинке со щитком заключается в устранении бесконечно большой величины скорости в передней кромке пластинки, вызванной применяемой моделью идеальной несжимаемой жидкости.

По модифицированному распределению скорости решается задача построения профиля крыла с элероном, обтекаемого с отрывом потока. Условия разрешимости задачи находятся с применением метода квазирешений обратных краевых задач аэрогидродинамики [1]. В качестве математической модели отрывного обтекания используется модель вязко-невязкого взаимодействия [2].

Приводятся результаты числовых расчетов и их анализ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 02-01-00061), Министерства образования РФ и Фонда НИОКР Республики Татарстан.

### Литература

1. *Елизаров А.М., Ильинский Н.Б., Поташев А.В.* Обратные краевые задачи аэрогидродинамики. М.: Наука, 1994. – 440с.
2. *Гозиш Л.В., Степанов Г.Ю.* Турбулентные отрывные течения. – М.: Наука, 1979. 368 с.

## NONLINEAR NON-SPHERICAL OSCILLATIONS OF A GAS BUBBLE IN A LIQUID

**Marat A.Ilgamov, Ludmila A.Kosolapova, Vladimir G.Malakhov**

\*Academy of Sciences of Bashkortostan,  
6, K. Marks str., Ufa 450015, Russia

\*\*Institute of Mechanics and Engineering KazSC RAS  
2/3 Lobachevsky str., Kazan 1420111, Russia

Axisymmetrical oscillations of a gas bubble in a liquid are considered in the regime of periodic sonoluminescence of a single air bubble in water under room conditions [1]. This problem became of interest in the context of attempts of investigators to explain this phenomenon discovered in the beginning of the nineties and to find out the conditions of its reproduction. One of the restrictions of experimental realization of the periodic sonoluminescence of a single bubble is stability of the spherical shape of the bubble during periodic oscillations. This issue has been investigated in quite a large number of papers. Nevertheless, nearly all of those studies used the assumption that during the oscillations the deflection of the bubble shape from the spherical one always remains small. At the same time, in particular, much attention was drawn to investigation of the influence of viscosity of the surrounding liquid. Nonlinear effects due to actual distortions of the spherical

shape of the bubble remained not considered. The present work is aimed at revealing the influence of the nonlinear effects on both the character of nonspherical oscillations and the boundary of stability of spherical oscillations.

In the mathematical model of the present work the liquid in the area near the bubble is assumed viscous incompressible. The liquid compressibility is taken into account only in the area far from the bubble where its dynamics is governed by the linear acoustics. The liquid motion is assumed potential. The liquid viscosity is taken into account via the boundary condition on the bubble surface. The gas in the bubble is ideal with spatially uniform pressure distribution varying in time with respect to the van-der-Waalse equation of state. The deflection of the bubble surface from the spherical one is presented in the form of a series in spherical harmonics. The final equations are derived up to second order of smallness relative to the values characterizing the distortion of the spherical shape of the bubble. This approach is a development of the technique proposed in [3] for investigation nonspherical oscillations of a bubble in the inviscid incompressible liquid. The mathematical model of [3] takes into consideration the terms of the second order of smallness relative to the value of the deflection of the shape from the spherical one only in the case when the deflection of the bubble surface from the spherical one is taken in the form of the second spherical harmonic. The assumption that the liquid flow is potential, which can be used if the liquid viscosity is small, leads to essential simplifications of the problem statement. For example, the model of [2] includes a partial differential equation for the liquid vorticity function while the model of the present work similar to that of [3] is a set ordinary differential equations. Those equations are solved by dormann-Prince method of the seventh order of accuracy. [4].

The technique developed in this work has first been tested by comparison of the results of its application with those obtained by the model [3] in the case of inviscid incompressible liquid. The satisfactory coincidence has been attained.

Then the influence of the amplitude of the harmonic variation of the pressure in the liquid and the value of the initial distortion of the spherical shape of the bubble on the nonspherical bubble oscillations have been investigated. The influence of nonlinear effects has been analyzed with and without nonlinear interaction of the initially perturbed single harmonic with others initially free of any perturbation. It has been shown that initially small perturbation of any single harmonic can lead to nondecaying nonspherical oscillations in the form of even harmonics.

This work was supported in part by the Russian Foundation of Basic Research (project 02-01-00100), the Program of Basic Research of the RAS (project “Dynamics of non-spherical gas and vapor bubbles in a liquid under strong and super-strong enlargement-compression”) and the Federal Target Program "Integration" (project B0020).

### References

1. Putterman S.J. and Weninger K.P. Sonoluminescence: How Bubbles Turn Sound into Light //Annu. Rev. Fluid Mech., 2000, 32, 445-476.
2. Hao Y. and Prosperetti A. The effect of viscosity on the spherical stability of oscillating gas bubbles //Phys. Fluids, 1999, 11(6), 1309-1317.
3. Ilgamov M.A., Nasibullaeva E.Sh. Nonlinear analog of the Plesset equation for nonspherical motion of a gas bubble//Trudy institute mekhaniki UNC RAN Ufa, izdatel'stvo “Gilem”, 2003, Vypusk 3, 164-177. (in Russian)
4. Hairer E., Nørsett S.P., Wanner G. Solving ordinary differential equations I. Nonstiff problems. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio, 1987.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ НЕСФЕРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ПУЗЫРЬКА ГАЗА В ЖИДКОСТИ

**М.А. Ильгамов\***, **Л.А. Косолапова\*\***, **В.Г. Малахов\*\***

\*Академия наук республики Башкортостан  
6, ул. К. Маркса, Уфа 450015, Россия

\*\*Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН  
2/3, ул. Лобачевского, Казань 1420111, Россия

Рассматриваются осесимметричные колебания газового пузырька в жидкости на режиме периодической сонолюминесценции отдельного воздушного пузырька в воде при комнатных условиях. Интерес к этой задаче возник в связи с попытками исследователей объяснить это явление, открытое в начале девяностых годов, и понять условия его воспроизведения [1]. Одним из условий экспериментальной реализации периодической сонолюминесценции отдельного пузырька является устойчивость сферической формы пузырька при периодических колебаниях. Исследованию этого вопроса посвящено довольно большое число работ.



Однако в большинстве из них исследование искажений сферической формы пузырька выполнено с применением предположения о малости возникающих отклонений формы пузырька от сферической. При этом, в частности, много внимания уделено изучению влияния вязкости окружающей жидкости [2]. Нелинейные эффекты, обусловленные реальными искажениями сферической формы пузырька, остались не исследованными. Настоящая работа посвящена изучению влияния нелинейных эффектов как на характер несферических колебаний пузырька, так и на границу области устойчивости сферических колебаний.

Для исследования используются соотношения, полученные в предположении, что жидкость в ближней к пузырьку области вязкая и несжимаемая, а сжимаемость учитывается только в дальней области с применением уравнений линейной акустики. Движение жидкости считается потенциальным, вязкость учитывается через динамическое граничное условие на поверхности пузырька. Газ в пузырьке идеальный, с равномерным распределением давления, которое подчиняется закону Ван-дер-Ваальса. Отклонение поверхности пузырька от сферической берется в виде ряда по сферическим гармоникам, в уравнениях учитываются члены второго порядка малости по отношению к величинам, характеризующим искажение сферической формы пузырька. Данный подход является развитием методики, предложенной в работе [3] для изучения несферических колебаний пузырька в идеальной несжимаемой жидкости. Полученные в [3] соотношения учитывают члены второго порядка малости по отношению к величине отклонения формы пузырька от сферической для случая, когда отклонение поверхности пузырька от сферической берется в виде второй сферической гармоники. Предположение о потенциальности движения жидкости, которое можно принять при малой вязкости жидкости, существенно упрощает соотношения задачи. Так, если модель [2] включает уравнение в частных производных для определения функции завихренности, то модель настоящей работы, как и работы [3], описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Для решения этой системы уравнений используется метод Дормана-Принса седьмого порядка точности [4].

Для тестирования разработанной методики проведено сравнение результатов настоящей работы с результатами, полученными по модели работы [3] для случая идеальной несжимаемой жидкости. Получено их удовлетворительное согласование.

Исследовано влияние амплитуды гармонического изменения давления в жидкости, начального сферического радиуса пузырька и величины начального искажения сферической формы на процесс колебаний пузырька. Проведен анализ влияния нелинейных эффектов как для одной отдельно взятой гармоник, так и при взаимодействии нескольких гармоник. Показано, что при наличии начального отклонения по любой из рассмотренных гармоник, могут наблюдаться незатухающие несферические колебания по четным гармоникам.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта 02-01-00100), в рамках программы фундаментальных исследований РАН (проект «Динамика несферических газовых и паровых пузырьков в жидкости на режимах с сильным и сверхсильным расширением-сжатием») и федеральной целевой программы «Интеграция» (код проекта Б0020).

### Литература

5. Putterman S.J. and Weninger K.P. Sonoluminescence: How Bubbles Turn Sound into Light //Annu. Rev. Fluid Mech., 2000, 32, 445-476.

6. Hao Y. and Prosperetti A. The effect of viscosity on the spherical stability of oscillating gas bubbles //Phys. Fluids, 1999, 11(6), 1309-1317.

7. Ильгамов М.А., Насибуллаева Э.Ш. Нелинейный аналог уравнения Плессета для несферического движения газового пузырька //Труды ин-та механики УНЦ РАН. Уфа: изд-во "Гилем", 2003. Вып.3. С.164-177.

8. Хайпер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. М.: Мир, 1990, 512с.

## EXPERIMENTAL STUDIES INTO THE EFFECT OF AIR CONTENT ON THE HUB VORTEX CAVITATION INCEPTION

Vadim P. Ilyin, Yurii L. Levkovsky

Krylov Shipbuilding Research Institute

44, Moskovskoe Shosse, 196158 St.Petersburg, Russia

The paper discusses the results of experimental studies obtained in the cavitation tunnel on the relationship between the hub vortex incipient

cavitation number and the advance ratio for various values of air content of water and model propeller speed. The analysis of the data showed no regularity in changing of the incipient cavitation number generally based on the pressure of saturated vapours, so it proved to be impossible to obtain a universal relationship between the cavitation number and the advance ratio.

This allowed the experimenters to suppose that the hub vortex cavitation is of gaseous rather than vaporous origin, i.e. the hollow hub-vortex core is filled with gas diffusing from circumfluent water and not with water vapours. In this case the gas pressure in the core should be determined by the pressure of the ambient liquid, i.e. under experimental conditions, by the static pressure in the test section of the cavitation tunnel.

By using this assumption a criterion for simulating inception of cavitation was found which helped to obtain the universal relationship between the moment of hub vortex cavitation inception and the advance ratio. The dependence of this moment on the air content of water and propeller revolutions per unit time is taken into account by the structure of the suggested criterion.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗДУХОСОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ КАВИТАЦИИ ОСЕВОГО ВИХРЯ ГРЕБНОГО ВИНТА**

**Вадим П. Ильин, Юрий Л. Левковский**  
ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова»

44, Московское шоссе, 196158 Санкт-Петербург, Россия

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального определения в кавитационной трубе зависимости от относительной поступи критического числа возникновения кавитации осевого вихря гребного винта при различных значениях воздухо содержания воды и частоты вращения модели. Было выявлено, что какая-либо закономерность изменения критического числа кавитации, образованного, как обычно, по давлению насыщенных паров, отсутствует, вследствие чего получить его универсальную зависимость от относительной поступи оказалось невозможным. Полученный результат позволил предположить, что кавитация осевого вихря гребного винта имеет не паровую, а газовую природу, т.е. полое ядро вихря заполняется диффундирующим из окружающего раствора газом, а не парами жидкости. Дав-

ление газа в ядре вихря при этом должно зависеть от давления в окружающей гребной винт жидкости, т.е. в условиях эксперимента – от статического давления в рабочем участке кавитационной трубы. В результате использования этого предположения найден критерий моделирования возникновения кавитации, с помощью которого получена универсальная зависимость момента возникновения кавитации осевого вихря от относительной поступи. Зависимость же этого момента от воздухо содержания воды и частоты вращения винта учитывается структурой предложенного критерия моделирования.

## **ONE-PARAMETRICAL STRUCTURES OF SPEED IN ACCOUNT OF A BOUNDARY LAYER AND TRACE OF POORLY STREAMLINE BODIES**

**Alexander M. Kishkin**

Moscow State Akademy of Instrument Making and Informatic  
20, Stromynka str., Moscow, Russia

In work the one-parametrical structures of speed for account of parameters of a boundary layer and trace are investigated. In accounts the integrated parities(ratio) of the charge, pulse both energy and equation of movement on internal border of a layer or on an axis of a trace are used. The conclusion of these parities(ratio) in the physically clear form with use uncertain on the initial stage of formparametre  $m$  is given. As a result of consideration various asymptotic ( $\delta \rightarrow \infty$ ) structures (fractional-rational, exponential and hyperbolic) is accepted satisfactorily appropriate to the theory and measurements th a structure. Expression of characteristic thickness of a boundary layer are shown to elementary tabulated integrals. In the assumption of a constancy of factor of friction across all layer final parameter of dissipaion is calculated.

The divergence of the received curves lays within the limits of an error of experimental data. Depending on formparametre is considered solution of superfluous system of the listed parities. The algorithm of account of a layer and trace using simple approached communication (connection) of thickness of a body of replacement and speed of external current is recommended.

# ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПРОФИЛИ СКОРОСТИ В РАСЧЁТЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ И СЛЕДА ПЛОХООБТЕКАЕМЫХ ТЕЛ

Александр М. Кишкин

Московская государственная академия приборостроения и информатики  
20, ул.Стромынка, Москва, Россия

В работе исследованы однопараметрические профили скорости для расчёта параметров пограничного слоя и следа. В расчётах используются интегральные соотношения расхода, импульса и энергии и уравнение движения на внутренней границе слоя или на оси следа. Приведён вывод этих соотношений в физически ясной форме с использованием неопределённого на начальном этапе формпараметра  $m$ . В результате рассмотрения различных асимптотических ( $\delta \rightarrow \infty$ ) профилей (дробно-рациональных, экспоненциальных и гиперболических) принят удовлетворительно соответствующий теории и измерениям  $th$ -профиль. Выражение характерных толщин пограничного слоя сведено к элементарным табличным интегралам. В предположении постоянства коэффициента трения поперёк всего слоя вычисляется конечный параметр диссипации.

Расхождение полученных кривых лежит в пределах погрешности экспериментальных данных. В зависимости от формпараметра рассмотрена разрешимость избыточной системы перечисленных соотношений. Рекомендован алгоритм расчёта слоя и следа, использующий простую приближённую связь толщины тела вытеснения и скорости внешнего течения.

## ABOUT DIFFERENT MODES CARRY-OVER OF GAS FROM VENTILATED CAVITY WITH A NEGATIVE CAVITATION NUMBER

Ivan I. Kozlov, Vladislav V. Prokof'ev

Institute of Mechanics, Moscow State University  
1, Michurinsky pr., 119899 Moscow, Russia

The mechanics, conducted in Institute of Mechanics MSU, of experimental researches of flat jet flow with formation of a artificial ventilated cavity with a negative cavitation number have shown, that as against a customary cavity the carry-over of gas is here essentially connected to

Rayleigh -Taylor instability of boundary of a cavity, and in an incipient state of development of surges on boundary of a cavity (in a nose cone), the mode close to periodic monomode takes place, then the spectrum of disturbances extends, the predominant surges disappear. Has appeared, that the predominant wavelength, observed in experiment, is close to a wavelength to a most fast planting disturbance pursuant to a linear theory, the area of an observed single mode limits (if to compare to a classic problem) beginning of stage of non-linear growth of disturbances by the way "of stable" bubbles.

On the other hand there are different modes alone cavitating flows. It is possible to indicate a limiting critical mode, when the cavity closes without a reentrant jet. The experiment has shown, that in relation to this value the modes of cavitating flow can be divide on subcritical and supercritical. In a supercritical mode the gas jet elapsed from a cavity will be derivate which one fast mixes up with a liquid, derivating a foam track. The measurements of a flow coefficient of gas entrained from a cavity have shown, that this value grows approximately linearly with growth of a pressure ratio in a cavity in subcritical and in the beginning of a supercritical mode. It is shown, that if to normalize a flow coefficient on critical value, and from a pressure ratio in a cavity to deduct its value in absence submission of gas, in new variables the unified linear dependence is fair for a wide range of parameters. Has appeared that the value of a critical factor carry-over of gas is proportional to a square of length of a cavity that it is possible to explain by the known quadratic law of propagation of front of Rayleigh -Taylor mixing at a turbulent mode of mixing. Is remarked, however, that the quadratic law is watched and for enough short cavity's, when there is a single mode of development of waves. The business that as against a classic problem growth of amplitude of waves here does not leave on stability, as the acceleration of a liquid considerably varies at motion on a normal to boundary of a cavity. But as against turbulent in a single mode the noticeable relation of a factor carry-over of gas to a Weber number takes place. The experiment has shown, that the critical factor notably (is approximately proportional to a Weber number in a degree -0,3) increases with reduction of a Weber number. Let's mark, that for very short cavity's, for which one the linear condition of development of disturbances takes place, the carry-over of gas owes is exponential to depend on length of a cavity.

So, the empirical-formula dependence for a factor of carry-over of gas from a flat cavity with a negative cavitation number is obtained. It is shown, that the modes of carry-over of gas are determined both modes of

development of Rayleigh -Taylor instability, and modes alone cavitating flows. The instability on boundary of a cavity develops to a similarly classic problem about Rayleigh -Taylor mixing, however there are also essential differences.

The activity is executed at financial support of the RFBR grant N 02-01-01065.

## **О РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ УНОСА ГАЗА ИЗ ВЕНТИЛИРУЕМОЙ КАВЕРНЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ЧИСЛОМ КАВИТАЦИИ**

**Иван И. Козлов, Владислав В. Прокофьев**

Институт механики МГУ

1, Мичуринский проспект, 119899 Москва, Россия

Проведенные в институте механики МГУ экспериментальные исследования плоского струйного течения с образованием искусственной вентилируемой каверны с отрицательным числом кавитации показали, что в отличие от обычной каверны унос газа здесь существенно связан с релей-тейлоровской неустойчивостью границы каверны, причем в начальной стадии развития волн на границе каверны (в головной части), имеет место режим близкий к периодическому одномодовому, затем спектр возмущений расширяется, доминирующие волны пропадают. Оказалось, что наблюдаемая в эксперименте доминирующая длина волны близка к длине волны наиболее быстро растущему возмущению в соответствии с линейной теорией, область наблюдаемого одномодового режима ограничивается (если сравнивать с классической задачей) началом стадии нелинейного роста возмущений в виде “стационарных” пузырей.

С другой стороны существуют различные режимы собственно кавитационных течения. Можно указать на предельный критический режим, когда каверна замыкается без возвратной струи. Эксперимент показал, что по отношению к этой величине режимы кавитационного течения можно разделить на докритический и сверхкритический. В сверхкритическом режиме образуется газовая струя, истекающая из каверны, которая быстро перемешивается с жидкостью, образуя пенный след. Измерения коэффициента расхода газа, уносимого из каверны показали, что эта величина растет приблизительно линейно с рос-

том коэффициента давления в каверне в докритическом и в начале сверхкритического режима. Показано, что если пронормировать коэффициент расхода по критической величине, а из коэффициента давления в каверне вычесть его величину в отсутствие поддува, то в новых переменных единая линейная зависимость справедлива для широкого диапазона параметров. Оказалось, что величина критического коэффициента уноса пропорциональна квадрату длины каверны, что можно объяснить известным квадратичным законом распространения фронта релей-тейлоровского перемешивания при турбулентном режиме перемешивания. Замечено, однако, что квадратичный закон наблюдается и для достаточно коротких каверн, когда существует одномодовый режим развития волн. Дело в том, что в отличие от классической задачи рост амплитуды волн здесь не выходит на стационар, так как ускорение жидкости значительно меняется при движении по нормали к границе каверны. Но в отличие от турбулентного в одномодовом режиме имеет место заметная зависимость коэффициента уноса газа от числа Вебера. Эксперимент показал, что критический коэффициент уноса заметно (примерно пропорционально числу Вебера в степени  $-0,3$ ) возрастает с уменьшением числа Вебера. Отметим, что для очень коротких каверн, для которых имеет место линейный режим развития возмущений, унос газа должен экспоненциально зависеть от длины каверны.

Итак, получена эмпирическая зависимость для коэффициента уноса газа из плоской каверны с отрицательным числом кавитации. Показано что режимы уноса газа определяются как режимами развития релей-тейлоровской неустойчивости, так и режимами собственно кавитационного течения. Неустойчивость на границе каверны развивается аналогично классической задаче о релей-тейлоровском перемешивании, однако имеются и существенные отличия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 02-01-01065.



**MATHEMATICAL MODEL FOR INTEGRATED PROBLEM  
OF THE HEAT AND MASS TRANSFER OF THE GAS FLOW  
WITH THE WALL MADE OF POLYMER COMPOSITE  
MATERIAL OF THE DESCENDING SPACECRAFT**

**Vilina M. Kudoyarova**

State Aviation Technical University of Ufa,  
12, K. Marks str., 450000 Ufa, Russia

Thermal protection may be one of two types: destruction and not destruction. In the given report destruction thermal protection is considered. Destruction of a surface layer occurs as a result of various physical and chemical transformations under influence of exposed to surface convective and radiation heat flows and diffusive flows of chemical active components, and also under action of forces of pressure and friction.

As a destruction thermal protection are applied the glass-reinforced plastics on phenolformaldehyde binder. About 10-30 % of weight of thermal protection transforms to gaseous products  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ . These gases go in adjoining to a surface of a descending spacecraft a layer of gas. Thus:

- changes the structure of an influencing gas flow;
- from the outside the heat is brought to adjoining the layer of gas to a surface;
- the part of heat brought to a surface of a descending spacecraft is absorbed, due to physical and chemical transformations on a surface of thermal protection;
- there is a process of the heat and mass transfer with a surface of thermal protection.

During research a process thermodestruction thermal protection from glass fibre plastics was investigated and the structure of gases is determined at destruction. also is offered a technique of theoretical definition of the energy spent on thermodestruction and Navie-Stoks equation is formulated in a modernized view with the specified processes.

This work is carried out with a financial support of the Ministry of Education of the Russian Federation (the grant №A03-3.18-125).

# **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СОПРЯЖЕННОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ГАЗОВОГО ПОТОКА СО СТЕНКОЙ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА КОСМИЧЕСКОГО СПУСКАЕМОГО АППАРАТА**

**Вилина М. Кудоярова**

Уфимский государственный авиационный технический университет  
12, ул. К. Маркса, 450000 Уфа, Россия

Тепловая защита бывает двух типов: разрушающаяся и не разрушающаяся. В данном докладе рассматривается разрушающаяся тепловая защита. Разрушение поверхностного слоя происходит в результате различных физико-химических превращений под воздействием подводимых к поверхности конвективных и радиационных тепловых потоков, диффузионных потоков химически активных компонент, а также под действием сил давления и трения.

В качестве разрушающейся тепловой защиты применяются стеклопластики на фенолоформальдегидном связующем. Около 10-30% массы тепловой защиты превращается в газообразные продукты  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ . Они поступают в слой газа, прилегающий к поверхности космического спускаемого аппарата. При этом:

- изменяется состав набегающего газового потока;
- в прилегающий к поверхности слой газа подводится тепло извне;
- поглощается часть тепла, подведенного к поверхности космического спускаемого аппарата, за счет физико-химических превращений на поверхности тепловой защиты;
- происходит тепломассообмен с поверхностью тепловой защиты.

В процессе исследования был изучен процесс термодеструкции тепловой защиты из стеклопластика, определен состав газов при разрушении. Также предложена методика теоретического определения энергии, затрачиваемой на термодеструкцию, сформулировано модернизированное уравнение Навье-Стокса с учетом указанных процессов.

Данная работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования РФ (грант № А03-3.18-125).

# APPLYING OF TERMOMECHANIC EFFECTS OF CAVITATION TO VARIOUS TECHNOLOGY

**Vladimir A. Kulagin**

Krasnoyarsk State Technical University, Krasnoyarsk, Russia

## ABOUT ONE APPROACH OF OPTIMIZATION OF THE BODY HYDROPROFILE

**Valeriy G. Leontyev, Andrey V.Potashev**

Chebotarev Research Institute of Mathematic and Mechanic,

Kazan State University

17, Universitetskaya str., Kazan 420008, Tatarstan, Russia

At designing airfoils and hydroprofiles of one of the most important problems the choice of the form of the structure providing optimum aerohydrodynamical characteristics is. In work [1] the numerical decision of a problem of a finding of the form of the indefinite - thin airfoils possessing the maximal lift coefficient is constructed. The purpose of the given work was development of a method of the decision of similar problems for structures of final thickness.

In this case the corporal structure is modelled by some "skeletal" line along which features - sources and drains [2] are continuously distributed. Thus lines of the current which is leaving a critical point and becoming isolated in a final point of a "skeletal" line will model a contour of a required structure.

For reception of a airfoil with the maximal lift coefficient in quality of minimized functional value of factor of lift coefficient with the opposite sign is familiar. On optimized functional as penal functions restriction - performance of a unseparative condition flows was imposed. Besides the design procedure allows to find the form of a profile with the minimal drag coefficient and a profile with high aerodynamic quality. Numerical calculations are lead, examples of optimum profiles are constructed.

The present research was supported by Russian Foundation for Basic Research (№ 02-01-00061) and by NIOKR fund of Tatarstan republic.

### References

1. *Leontiev V. G.* The numerical decision of a problem on optimization of the arc near to the horizontal screen // Modern problems of a space science and technics. II International scientific and technical conference of young scientists and experts. Zhukovsky, October, 8-12, 2002. Theses of reports. - Zhukovsky: TSAGI: the Aviation printed court yard, 2002. P.126
2. *Victorov G.V.* Hydrodynamic theory of lattices. - M.: the Science, 1979.-536 p.

## ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ОПТИМИЗАЦИИ ТЕЛЕСНОГО ГИДРОПРОФИЛЯ

**Валерий Г. Леонтьев, Андрей В. Поташев**

НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева

Казанского государственного университета

17 ул. Университетская, 420008 Казань, Татарстан, Россия

При проектировании крыловых и гидродинамических профилей одной из наиболее важных проблем является выбор формы профиля, обеспечивающей оптимальные аэрогидродинамические характеристики. В работе [1] построено численное решение задачи нахождения формы бесконечно-тонких профилей, обладающих максимальной подъемной силой. Целью данной работы являлась разработка метода решения аналогичных задач для профилей конечной толщины.

В данном случае телесный профиль моделируется некоторой «скелетной» линией, вдоль которой непрерывно распределены особенности – источники и стоки [2]. При этом линии тока, выходящие из критической точки и замыкающиеся в конечной точке «скелетной» линии будут моделировать контур искомого профиля.

Для получения профиля с максимальной подъемной силой в качестве минимизируемого функционала бралось значение коэффициента подъемной силы с обратным знаком. На оптимизируемый функционал в виде штрафных функций накладывалось ограничение – выполнение условия безотрывности обтекания. Кроме того, методика расчета позволяет находить форму профиля с минимальным коэффициентом сопротивления и профиль с наибольшим аэродинамическим качеством. Проведены числовые расчеты, построены примеры оптимальных профилей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 02-01-00061) и Фонда НИОКР Республики Татарстан.

### Литература

1. *Леонтьев В. Г.* Численное решение задачи об оптимизации дужки вблизи горизонтального экрана // Современные проблемы аэрокосмической науки и техники. II Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов. Жуковский, 8-12 октября 2002 г. Тезисы докладов. – Жуковский: ЦАГИ: Авиационный печатный двор, 2002. С.126

2. *Викторов Г. В.* Гидродинамическая теория решеток. – М.: Наука, 1979.–536с.

## **SOUND RADIATION INDUCED BY BODIES MOTION WITH HIGH SPEED AND ACCELERATIONS**

**Yurii L. Levkovsky**

Krylov Shipbuilding Research Institute  
44, Moskovskoye shosse, 196158 St.Petersburg, Russia

Traditionally in classical acoustics the radiation excited by simple harmonic fluctuations of bodies on various modes is investigated. The solution of the task on radiation of a sound by a pulsing and oscillating sphere is widely known, while characteristics of radiation at it aperiodic motion are investigated insufficiently.

The aim of the paper is to make up for the deficiency. It is presented the exact solution of the task on sound radiation of a sphere moving forward from a quiet state with arbitrary acceleration.

It is shown, that at the high speeds and accelerations the spectral levels of a broad-band radiation are significant.

The results of obtained solution are extended on bodies of an arbitrary form.

## **АКУСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ВЫЗВАННОЕ ДВИЖЕНИЕМ ТЕЛ**

**С БОЛЬШИМИ СКОРОСТЯМИ И УСКОРЕНИЯМИ**

**Юрий Л. Левковский**

ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова»,  
44, Московское шоссе, 196158 Санкт-Петербург, Россия

В классической акустике традиционно исследуется излучение, возникающее при гармонических колебаниях тел на различных модах. Широко известно решение задачи об излучении звука пульсирующей и осциллирующей сферой, в то время как характеристики излучения при ее аperiodическом движении исследованы недостаточно.

Целью доклада является восполнение этого пробела. Приводится точное решение задачи об акустическом излучении сферы, поступательно движущейся из состояния покоя с произвольным ускорением.

Показано, что при больших скоростях и ускорениях спектральные уровни широкополосного излучения оказываются значительными.

Результаты полученного решения обобщаются на тела произвольной формы.

## ONE ALGORITHM OF THE SEPARATING FLOW

Vsevolod V. Lezhnev, Aleksey N. Markovsky

Kuban State University

149 Stavropolskaya str., 350040 Krasnodar, Russia

The present paper is devoted the problem of separating flow of the arc  $S$  for the ideal liquid. We shall consider the solution  $u(x)$  of the boundary problem for the biharmonic equation in the separation zone  $Q$ ,  $\partial Q = S \cup L$ . By the function  $u(x)$  we can determine the stream function of exterior flow, the velocity of wich is constant on the  $L$ , and the  $L$  is a streamline.

## ОДИН АЛГОРИТМ ОТРЫВНОГО ОБТЕКАНИЯ

Всеволод В. Лежнев, Алексей Н. Марковский

Кубанский государственный университет

350040, Краснодар, ул. Ставропольская, 149

Настоящая работа посвящена задаче отрывного обтекания дуги  $S$  идеальной жидкости. Рассматривается решение  $u(x)$  краевой задачи для бигармонического уравнения в отрывной зоне  $Q$ ,  $\partial Q = S \cup L$ , Через функцию  $u(x)$  определяется функция тока внешнего течения, скорость которого на  $L$  постоянна, и  $L$  является линией тока.

## CHARACTERISTIC EQUATIONS OF DOUBLE-ROW CASCADE FLOW

S. C. Li

Fluid Dynamic Research Centre, Warwick University

Gibbet Hill, Coventry CV4 7AL, UK

This paper, for the first time, presents the characteristic equations of double-row cascade flow, which was derived 40 years ago<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> It was part of graduation thesis (PhD equivalent) that also included numerical and experimental verification and an example case. It has been circulated internally in China but never published outside due to historical reasons.

The analytical solution to double-row cascade flow was then needed for developing a novel runner structure of hydraulic turbines by using double-row cascade (or named as split blade or long-short blade) to improve their cavitation performance. This theoretical solution has served well for the purpose and led to the high-performance turbo-machine developments in 1960's. For example, based this result, a Francis turbine of 100 MW was developed by the Harbin Research Institution of Large Electric Machinery for Yunfeng Power Station (China) in 1965, showing great improvement of cavitation performance compared with its counterpart. In 1970, this theoretical solution has been applied to an axial flow pump by Shanghai Pump Factory and also showed remarkable advance in cavitation performance. These prototype tests verified the theoretical prediction that

- The cavitation performance improvement is due to the even up of the velocity distribution on the suction surface of blades, which results in lower cavitation index of machine;
- Better off-design energy-performance stems from the assistant role of the leading row cascade in reducing the blade-inlet loading of the main cascade, which widens up the high efficiency zone.

Recently, it has also been proven that this structure offers a great resistance to silt-erosion owing to the reductions of both the blade-inlet load and the inter-blade vortices, as shown by the Francis turbine at Lubuge power station (China). Now this type of runner structure is a preferable choice for anti-synergistic erosion<sup>2</sup> turbines. Having seen such a remarkable development in the last 40 years, I would like to present the original theoretical work to the HSH-2004.

**STUDY OF THE STRUCTURE OF THE STATIONARY  
SEPARATED FLOWS AROUND BLUFF BODIES  
WITHIN THE FREE-INTERACTION THEORY FRAMEWORK**

**Maxim A. Lushnikov**

Institute of Mechanics, Moscow State University  
Michurinsky prospect, 119899, Moscow, Russia

The transition from the asymptotic structure of separated flow past a bluff body to the structure of the flow past a thin body within the framework of the free interaction theory is studied. Such transition occurs in the

---

<sup>2</sup> That is, the concert damage caused by cavitation and silt abrasion.

flow past an elliptical cylinder when its elongation tends to the case of a flat plate.

This transition is studied numerically. The problem of the flow past a cascade of elongated bodies is solved. The dependency of the elongation on the Reynolds number is prescribed in such a way that the problem is reduced to the free-interaction problem in the compensation regime. This means that the pressure gradient is determined by the requirement of having the same flow rate through different cross-sections of the cascade along the flow. As the distance between the bodies in the cascade increases the onset of a regime is expected when the reattachment occurs in a locally inviscid zone where the Bernoulli equation holds true, and the momentum conservation uniquely determines the position of this zone.

The solution obtained are analysed in the range of the flow parameters in which convergent solutions of the problem with stationary boundary conditions were obtained.

## **ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ СТАЦИОНАРНЫХ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВОКРУГ ПЛОХО ОБТЕКАЕМЫХ ТЕЛ В РАМКАХ ТЕОРИИ СВОБОДНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

**М.А. Лушников**

Институт механики МГУ,

1, Мичуринский пр-т, 119899 Москва, Россия

Исследуется переход от асимптотической структуры отрывного течения затупленного тела, к структуре течения около тонкого профиля в рамках теории свободного взаимодействия. Такой переход можно получить, рассматривая течение вокруг эллиптического цилиндра и уменьшая его удлинение до значения у тонкой пластинки.

Проведено численное моделирование этого перехода. Решается задача обтекания решетки тел изменяемого удлинения. При этом зависимость удлинения от числа Рейнольдса подобрана так, что поставленная задача сведена к типу задач о свободном взаимодействии в компенсационном режиме. Последнее означает, что градиент давления определяется из условия постоянства расхода жидкости через различные сечения решетки вдоль потока. При увеличении шага решетки возникает режим, в котором смыкание отрывной зоны происходит в локально-невязкой области присоединения потока, внутри



которой справедлив интеграл Бернулли; ее положение полностью определяется условием сохранения количества движения на разрыве.

Предлагается анализ полученных решений и области изменения параметров задачи, в которой существует сходящееся решение со стационарными краевыми условиями.

## **ON THE DEFLECTORS OF OPTIMUM SHAPE**

**Dmitry V. Maklakov**

Chebotarev Research Institute of Mathematic and Mechanic,

Kazan State University

17, Universitetskaya str., 420008 Kazan, Russia

In the papers [1]-[4] a series of problems on defining optimum hydrodynamic shapes in free-surface flows has been solved. The optimization has been based on nontrivial application of Jensen's inequality to the obtained functionals under nonlinear restrictions. In [1] the problem on the deflector of optimum shape that declines a free jet has been solved. In [2] the problem on the optimum parachute in Helmholtz flow has been investigated. In [3] the problem on the optimum parachute has been generalized for the wake model by Joukovsky – Roshko – Eppler. In [4] the optimum shape of a planing plate has been found. For all of the indicated problems exact analytical solutions have been constructed. A systematical presentation of the results can be found in the monograph [5].

In this paper the problem solved in [1] is generalized. The deflector now declines the jet that effuses from a semi infinite nozzle of finite width. The devices for declining the jets – deflectors – have applications in many technical domains. In particular, the thrust reversal device of bucket type for turbojet engine can be considered as a deflector that declines the reversal jet to create the back thrust that needs for braking an aircraft. The principal value that defines the effectiveness of the deflector is the deflection angle of the jet. The goal of the investigations carried out in the work is to define the deflector of the best shape that provides either the deflection of the jet through the maximum angle under the given arc length of the deflector or (that is equivalent) provides the minimum arc length of the deflector under the given deflection angle. The location of the deflector with respect to the outside nozzle section is determined in solving. In so doing the contraction coefficient of the jet is assumed to be given. It is demonstrated that

the solution of this essentially nonlinear problem can be represented as a superposition of two nonlinear ones : the problem on the deflector of optimum shape in the free jet and that on the deflector of optimum shape inside an infinite nozzle. The series of optimal defelctor is constructed for a variety of deflection angles and contraction jet coefficients. It is shown that the obtained solutions realize global extremes

The work has been supported by the Russian Foundation of Basic Research under grant N 02-01-00836.

### References

1. Maklakov D.V. The maximum resistance of a curvilinear obstacle subjected to the action of free jets with separation, *Sov. Phys., Dokl.* **33**, No.1, 1988, pp. 11–13; translation from *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **298**, No.3, pp. 574 – 577 (1988).

2. Maklakov D.V. Some remarks on the exact solution for an optimal impermeable parachute problem. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **166** (2), 2004, pp.591 – 596.

3. Maklakov, D.V., Uglov, A.N., On the maximum drag of a curved plate in flow with a wake, *European Journal Appl. Math.*, **6** (5), 1995, pp. 517 – 527.

4. Maklakov, Dmitri V. A note on the optimum profile of a sprayless planing surface, *J. Fluid Mech*, **384**, 1999, pp. 281– 292 .

5. Maklakov D.V. Nonlinear problems of hydrodynamics of potential flows with unknown boundaries, (Russian) [B] Moskva: Yanus–K, 1997, 280 p., [ISBN 5-88929-033-9].

## О ДЕФЛЕКТОРАХ ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ

**Дмитрий В. Маклаков**

НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева

Казанского государственного университета

Университетская, 17, 420008 Казань, Россия

В работах [1]-[4] решена серия задач об определении оптимальных гидродинамических форм в течениях со свободными границами. Оптимизация основана на нетривиальном применении неравенства Йенсена к полученным функционалам с нелинейными ограничениями. В работе [1] решена задача о дефлекторе оптимальной формы, отклоняющем свободную струю. В работе [2] исследуется задаче о форме

оптимального парашюта при обтекании по схеме Кирхгоффа. В работе [3] задача об оптимальном парашюте обобщена на случай обтекания по схеме Жуковского – Рошко –Эпплера. В статье [4] найдена форма оптимальной глассирующей пластины. Для всех вышеуказанных задач построены точные аналитические решения. Систематическое изложение результатов можно найти в монографии [5].

В данной статье обобщается задача, решенная в [1]. Теперь дефлектор отклоняет струю, истекающую из полубесконечного канала конечной ширины. Устройства для отклонения струй – дефлекторы – применяются во многих областях техники. В частности, реверсивное устройство ковшового типа для турбо–реактивных двигателей может рассматриваться как дефлектор, отклоняющий реверсивную струю для создания обратной тяги, необходимой для торможения самолета. Основной величиной, определяющей эффективность работы дефлектора, является угол отклонения струи. Целью исследований, проводимых в данной работе, является определение дефлектора наилучшей формы, которая обеспечит отклонение струи на максимальный угол при заданной длине дуги дефлектора, либо, что равнозначно, отклонение струи на заданный угол при минимальной длине дуги. Положение дефлектора по отношению к срезу канала определяется в ходе решения задачи. При этом коэффициент сжатия струи считается заданным. Показано, что решение данной существенно нелинейной задачи может быть представлено как суперпозиция решений двух нелинейных задач: о дефлекторе оптимальной формы в свободной струе и о дефлекторе оптимальной формы внутри бесконечного канала. Построена серия оптимальных дефлекторов для различных углов отклонения и коэффициентов сжатия. Доказано, что найденные решения реализуют глобальный экстремум.

Работа получила финансовую поддержку РФФИ (проект N 02–01–00836).

### Литература

1. Маклаков Д.В. О максимуме сопротивления криволинейного препятствия, обтекаемого с отрывом струй. ДАН СССР, **298**, No.3, 1988, с. 574 – 577.
2. Maklakov D.V. Some remarks on the exact solution for an optimal impermeable parachute problem. Journal of Computational and Applied Mathematics, **166** (2) , 2004 , pp.591–596.

3. 3. Maklakov, D.V., Uglov, A.N., On the maximum drag of a curved plate in flow with a wake, *European Journal Appl. Math.*, **6** (5), 1995, pp. 517 – 527.
4. Maklakov, Dmitri V. A note on the optimum profile of a sprayless planing surface, *J. Fluid Mech*, **384**, 1999, pp. 281– 292 .
5. Маклаков Д.В., Нелинейные задачи гидродинамики потенциальных течений с неизвестными границами. Москва: Янус-К, 1997, 280 p. [ISBN 5-88929-033-9].

## **BUBBLES AND CAVITIES AS TOOLS FOR DRAG REDUCTION**

**Leonid I. Maltzev, Boris G. Novikov**

Institute of Thermophysics SB RAS

1, Acad. Lavrentyev Av., 630090 Novosibirsk, Russia

One of the promising fields in application of cavitation flows for reduction of ship drag is formation of rather thin gaseous stratum (cavity) under the bottom of barges and tankers. This requires that the shape of ship bottom was in compliance with the interface shape (the surface of equal pressure). The usage of a wedge (interceptor) as a cavitator is not efficient. For low Froude numbers, the limiting length of the cavity behind the wedge is much smaller than the ship length. The variant of several cavities along the ship length decreases the method's efficiency. We considered the opportunity to choose the shape of a cavitator that creates on a flat plate a thin gaseous stratum with almost unlimited spread.

The alternative to cavitation is saturation of boundary layer with gas bubbles. There exist several very different mechanisms for influence of bubbly shroud on parameters of boundary layer. For a high rate of air feed into the boundary layer, a formation of stagnation zone behind the porous insertion is possible. But its length is long enough. At low and middle gas flow rate into the gradientless boundary layer the key role belongs to concentration of bubbles in the near-wall layer  $y^+ = y \cdot u^* / \nu < 200$  . However, this near-wall layer of longitudinal vortices tends to press back the bubbly shroud from the wetted surface. Therefore for the zero and positive pressure gradient the length of the bubble-saturated layer  $y^+ < 200$  is not high.

The more efficient way to control the characteristics of the bubbly boundary layer through formation of the proper pressure gradient along the

wetted surface. Under impact of a negative pressure gradient the bubbles outstrip the surrounding liquid layers. Under impact of a positive pressure gradient the bubbles move counter-stream. The Zhukovsky's force, that cat on bubbles moving in a shear layer, pushes those bubbles to the wetted surface and increases here the velocity gradient. The positive gradient moves the bubbles counter-flow, and the Zhukovsky's force repulses them out from the layer  $y^+ < 200$ ; this reduces the velocity gradient in the depth of a turbulent boundary layer. Here we see the problem of finding a body shape with a given pressure distribution on the most of the length of the contour sought.

## **ПУЗЫРЬКИ И КАВЕРНЫ, КАК СРЕДСТВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ**

**Леонид И. Мальцев, Борис Г. Новиков**

Институт теплофизики СО РАН

1, пр. Академика Лаврентьева, 630090 Новосибирск, Россия

Одной из перспективных возможностей практического использования кавитационных течений для уменьшения сопротивления судов является образование сравнительно тонкой газовой прослойки (каверны) под днищем барж и танкеров. Для этого необходимо, чтобы форма днища судна соответствовала форме свободной поверхности раздела (поверхности постоянного давления). Использование в качестве кавитатора клина (интерцептора) малопродуктивно. При малых числах Фруда предельная длина каверны за клином много меньше длины судна. Создание нескольких каверн по длине судна значительно уменьшает эффективность метода. Рассмотрена возможность выбора формы кавитатора, обеспечивающего создание на плоской пластине сравнительно тонкой газовой прослойки практически неограниченной протяженности.

Альтернативой кавитации является насыщение пограничного слоя пузырьками. Выявлено несколько возможных существенно различающихся механизмов воздействия пелены пузырьков на характеристики пограничного слоя. При достаточно большой скорости подачи в пограничный слой воздуха за пористой вставкой возможно формирование застойной области. Однако ее длина сравнительно невелика. При малой и умеренной скорости подачи газа в безградиентный

пограничный слой определяющую роль играет концентрация пузырьков в пристенном слое  $y^+ = y \cdot u^* / \nu < 200$ . Однако, пристенный слой продольных вихрей стремится оттеснить от смоченной поверхности плену пузырьков. Поэтому при нулевом и положительном градиенте давления протяженность насыщенного пузырьками слоя  $y^+ < 200$  весьма ограничена.

Представляется более эффективным управление характеристиками насыщенного пузырьками пограничного слоя с помощью создания нужного градиента давления вдоль смоченной поверхности. Под воздействием отрицательного градиента давления пузырьки обгоняют окружающие слои жидкости. Силы Жуковского, воздействующие на движущиеся в сдвиговом слое пузырьки, прижимают их к смоченной поверхности, увеличивая на ней градиент скорости. Под воздействием положительного градиента давления пузырьки движутся против течения, под воздействием силы Жуковского вытесняются из слоя  $y^+ < 200$  и уменьшают градиент скорости во всей толще турбулентного пограничного слоя. Здесь мы сталкиваемся с задачей определения формы тела с заданным распределением давления на большей части длины искомого контура.

## **APPROACHED METHOD OF DESIGNING AIRFOIL NEAR GROUND AT ANGLE OF ATTACK**

**Renat F. Mardanov**

Chebotarev Research Institute of Mathematic and Mechanic,  
Kazan State University  
17, Universitetskaya St., Kazan 420008, Tatarstan, Russia

It is known, what the solving of problem of aerodynamic design of airfoil near ground even in the framework of model of ideal incompressible fluid (IIF) has several the mathematical difficulties, main of them – double-connectivity of flow area. Solution of this problem, based on the theory of elliptic functions, has been presented in work [1]. Dummy plane-parallel stream IIF under the ground is entered in consideration in work [2], due to what flow area becomes simple connectivity but the function of complex potential becomes piecewise analytic. At some values of initial parameters in these methods difficulties during the numeric calculations appear. There-

fore using of approached method [3] is expedient. It permits to make fast a calculation with good accuracy. However designed airfoils have the lower surface practically parallel to the ground and this is an essential restriction of application of this method.

In the present work this method is generalized on a case of design airfoil near ground at angle of attack. Lower surface of airfoil is assumed plain and turned on given angle to ground. On an upper surface of airfoil velocity distribution as function of parameter in canonical areas is given. By consider of suction and blowing channels the given problem is reduced to mixed boundary-value problem for analytical function in simple connectivity area, namely to problem of aerodynamic design of symmetric airfoil in unbounded flow with suction channel near nose of airfoil and with blowing channel in trailing edge. Flow area becomes simple-connectivity, but two-sheeted. Numerically analytical solution of this problem has been found and examples of airfoil have been calculated for different angles of inclination of airfoil and different distances from trailing edge of airfoil to ground. The comparison of velocity distribution as function of arc abscissa obtained by approach method with velocity distribution obtained by exact method [2] has been presented, and on its basis conclusions about adaptability developed approach method has been made.

The work was supported by RFFI (the project No 02-01-00061) and by NIOKR fund of Tatarstan Republic.

### References

1. *Galyautdinov M.I., Maklakov D.V.* Designing of airfoil streamlined near ground // Russian Aeronautics. 1994. No 3, 3–7.
2. *Il'inskiy A.N., Il'inskiy N.B., Maklakov D.V., Potashev A.V.* Method of aerodynamic design airfoil near ground // Russian Aeronautics. 1995. No 2, 54–62.
3. *Mardanov R.F.* About the one approach to airfoil design near ground // Russian Aeronautics. 2003. No 2, 35–38.

# **ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ВБЛИЗИ ЭКРАНА ПОД УГЛОМ АТАКИ**

**Ренат Ф. Марданов**

НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева

Казанского государственного университета

17 ул. Университетская, 420008 Казань, Татарстан, Россия

Как известно, при решении задачи проектирования профиля крыла экраноплана даже в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости (ИНЖ) встречается ряд математических трудностей, основная из которых – двусвязность области течения. Решение этой задачи, опирающееся на классический аппарат эллиптических функций, приведено в работе [1]. В работе [2] под экраном вводится в рассмотрение фиктивный плоскопараллельный поток ИНЖ, благодаря чему область течения становится односвязной, но функция комплексного потенциала – кусочно-аналитической. При некоторых значениях исходных параметров в этих методах возникают трудности при числовых расчетах, поэтому целесообразным оказывается использование приближенного метода [3], который позволяет проводить проектировочные расчеты с небольшими машинными затратами и хорошей точностью. Однако существенным ограничением применимости этого метода является то, что спроектированные профили имеют нижнюю поверхность практически параллельную экрану.

В настоящей работе этот метод обобщен на случай проектирования крылового профиля близи экрана под углом атаки. Нижняя поверхность профиля полагается плоской, наклоненной под заданным углом к экрану, а на верхней поверхности задается распределение скорости как функция параметра во вспомогательной плоскости. Путем введения каналов отбора и выдува, задача сводится к смешанной обратной краевой задаче для аналитической функции в односвязной области, а именно, к задаче проектирования в неограниченном потоке симметричного крылового профиля с каналом отбора в окрестности передней кромки и с каналом выдува в задней кромке профиля. Область течения в физической плоскости становится при этом односвязной, но двулистной. Проведено численно-аналитическое решение этой задачи и приведены примеры числовых расчетов для различных углов наклона профиля и различных отстояний его задней кромки от экрана.



Дано сравнение распределения скорости как функции дуговой абсциссы, полученного при решении задачи приближенным методом, с распределением скорости, полученным точным методом [2], и на основе этого сделаны выводы о применимости предложенного приближенного метода.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 02-01-00061) и фонда НИОКР Республики Татарстан.

### Литература

1. *Галяутдинов М.И., Маклаков Д.В.* Проектирование крыловых профилей, обтекаемых вблизи твердого экрана // Изв. ВУЗов. Авиационная техника. 1994. № 3. С. 3–7.
2. *Ильинский А.Н., Ильинский Н.Б., Маклаков Д.В., Поташев А.В.* Метод аэродинамического проектирования крылового профиля экраноплана // Изв. ВУЗов. Авиационная техника. 1995. № 2. С. 54–62.
3. *Марданов Р.Ф.* Об одном подходе к проектированию профиля крыла вблизи экрана // Изв. ВУЗов. Авиационная техника. 2003. № 2. С. 35–38.

## THE MOTION OF VISCOUS FLUID CONTAINING A PERIODIC LATTICE

**Sergey I. Martynov, Alexey O. Syromyasov**  
Mordovian State University

68 Bolshevistskaya str., 430000 Saransk, Russia

The shear flow of viscous fluid containing infinite cubic lattice of rigid spheres is considered. It is supposed that no external forces or torques exert upon the lattice. The velocity and the pressure are

$u_i = C_{ij}x_j$ ,  $p = P + p'$ , where  $v_i$  and  $p'$  are disturbances caused by the presence of the lattice. The linear by  $x$  component of velocity and constant summand  $P$  are presumed to be known. The method proposed in [1] is modified to find the disturbances. Basing upon [2] special functions are constructed. These functions are periodic by all 3 arguments and satisfy the Stokes equation. The general form of the disturbances of velocity and pressure is proposed. Basing upon it the form of the incompressibility condition is obtained. The computer program written in *Mathematica* package helps to find tensors, describing the behavior of the fluid. It is shown that in the absence of the external torque spheres in the lattice don't rotate relatively to

the fluid. The obtained result confirms that of Nunan and Keller [3]. It is found that the behavior of spheres in the lattice differs from the behavior of two hydrodynamically interacting spheres, which rotate relatively to the fluid even in the absence of the external torque [1].

### References

1. Мартынов С.И. Взаимодействие частиц в суспензии /С.И. Мартынов. - Казань: Изд-во Казан. матем. об-ва, 1998. - 135 с.
2. Бердичевский В.Л. Вариационные принципы механики сплошной среды /В. Л. Бердичевский. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. - 448 с.
3. Nunan K.C. Effective viscosity of a periodic suspension/ Nunan K.C., Keller J.B.// J.Fluid Mech. - 1984. - Vol.142. - P.269-287.

## ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ РЕШЕТКОЙ ЧАСТИЦ

Сергей И. Мартынов, Алексей О. Сыромясов

Мордовский государственный университет  
68, ул. Большевикская, 430000 Саранск, Россия

Рассматривается сдвиговой поток вязкой жидкости с бесконечной кубической решеткой сфер, на которую не действуют внешние силы и моменты. Скорость и давление ищутся в виде:  $u_i = C_{ij}x_j$ ,  $p = P + p'$ , где  $v_i$  и  $p'$  – возмущения, обусловленные присутствием решетки, линейная по  $x$  компонента скорости и постоянная составляющая давления считаются известными. Для определения возмущений модифицируется метод, изложенный в [1]. Способом, описанным в [2], построены специальные функции, являющиеся периодическими по трем переменным и удовлетворяющие уравнению Стокса. Указан наиболее общий вид возмущения скорости и давления. Исходя из этого получен вид условия несжимаемости для данного типа потока. В системе Mathematica написана программа, позволяющая подстановкой в условия на поверхности сферы, центр которой находится в начале координат, найти соотношения между компонентами тензоров, описывающих возмущение поля скорости и давления. Исходя из этих соотношений, установлена структура данных тензоров. Показано, что в отсутствие внешнего момента частицы не вращаются относительно жидкости. Тем самым установлено качественное отли-

чие от случая двух гидродинамически взаимодействующих сфер, которые вращаются относительно жидкости в отсутствие внешнего момента [1] и подтверждены результаты, полученные в [3].

#### **Литература**

1. Мартынов С.И. Взаимодействие частиц в суспензии /С.И.Мартынов. - Казань: Изд-во Казан. матем. об-ва, 1998. - 135 с.
2. Бердичевский В.Л. Вариационные принципы механики сплошной среды/В. Л. Бердичевский. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. - 448 с.
3. Nunan K.C. Effective viscosity of a periodic suspension/ Nunan K.C., Keller J.B.// J.Fluid Mech. - 1984. - Vol.142. - P.269-287.

### **MATHEMATICAL MODELLING OF WATER ENTRY OF A WEDGE WITH FINITE FROUDE NUMBER**

**Oleksandr M. Mayboroda**

Kyiv State Maritime Academy, 9, Frunse St., 04071 Kyiv, Ukraine

The present paper is devoted to mathematical modeling of water entry. The task is considered in common non-stationary nonlinear setting. Unlike the well-know approaches more common formulation of the problem is provided here, taking into account the following:

- arbitrary law of motion, body shape and deformation motion;
- spray-roots effect and finite perturbations of free fluid surface;
- initial fluid velocity and free surface shape perturbation;
- gravity effect.

Wetted surface of bottom and free fluid surface are represented by vortex sheets. The fluid perturbed motion velocity was described by means of integral in Cauchy form and singular-integral equation for bottom vortex density is constructed. The mathematical model of ship waves was constructed in order to determine the free surface vortex density.

The computational program utilizing the method of discrete vortices is developed. In order to test the mathematical model the numerical realization for immersion of wedges (as typical sections of ships hulls) ) was applied. The summary and distributed loads as well as the laws of motions for the wedges of infinite and finite mass are obtained and compared with known experimental results.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВХОДА В ВОДУ КЛИНА ПРИ КОНЕЧНЫХ ЧИСЛАХ ФРУДА

Александр Н. Майборода

Киевская государственная академия водного транспорта  
ул. Фрунзе 9, 04071 Киев, Украина

Работа посвящена математическому моделированию процесса входа в воду твердого тела. Задача рассматривается в нестационарной нелинейной постановке. В отличие от известных подходов предлагается более общая формулировка задачи, учитывающая:

- произвольный закон движения тела, в том числе деформационное движение;
- влияние брызговой струи и конечные возмущения свободной поверхности жидкости;
- наличие начального движения и формы свободной поверхности жидкости;
- весомость жидкости.

Смоченная поверхность тела и возмущённая свободная граница жидкости представляются вихревыми слоями. Скорость возмущённого движения жидкости описывается интегралом типа Коши и строится сингулярное интегральное уравнение для определения плотности вихревого слоя смоченной поверхности тела. Для определения плотности вихревого слоя свободных границ предлагается математическая модель корабельных волн.

Численная реализация математической модели выполняется с использованием метода дискретных вихрей. В порядке тестирования модели рассматривается численное моделирование погружения клиньев, как типичных образований судовых корпусов. Результаты расчёта суммарных и распределённых нагрузок, а также законов движения клиньев бесконечной и конечной массы сравниваются с известными экспериментальными данными.

# **THE BOUNDARY CONDITIONS FOR THE STREAM FUNCTION-VORTICITY NAVIER-STOKES EQUATIONS**

**Alexander B. Mazo**

Institute of Mechanics and Engineering  
of Kazan Science Center of Russian Academy of Sciences,  
2/31, Lobachevsky str., 420111 Kazan, Russia

A solution of the boundary conditions statement for stream function-vorticity Navier-Stokes equations was suggested in the case of laminar incompressible viscous flow. The universal formulations for the desired boundary functions, independent on spatial discretization method, were obtained. Values of the stream function on the walls are defined by means of the set of the intermediary harmonic functions. These functions are solutions of the ordinary equiptype problems, they defined only by the computed area geometry, and so calculated once.

The boundary value problem for the vorticity distribution along the flowed profile was formulated. Standard approaches of finite-differences or finite element discretization for this problem lead to the vorticity Dirichlet boundary statements with order of accuracy the same approximation order for basic equations.

Application these methods to the boundary conditions statement do not increase computational burden but at once they expand much the class of problems which may be solved in the frame of the stream function-vorticity Navier-Stokes model.

# **ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА В ПЕРЕМЕННЫХ ФУНКЦИЯ ТОКА – ЗАВИХРЕННОСТЬ**

**Александр Б. Мазо**

Институт механики и машиностроения  
Казанского научного центра Российской академии наук  
2/31, ул. Лобачевского, 420111 Казань, Россия

Предложено решение проблемы постановки граничных условий для уравнений Навье-Стокса в переменных функция тока-вихрь при моделировании нестационарного несимметричного обтекания тел ламинарным потоком несжимаемой вязкой жидкости. Получены не зависящие от способа пространственной дискретизации уравнений

универсальные соотношения, определяющие значения искомым функций на обтекаемых поверхностях.

Значения функции тока на контурах определяется через систему вспомогательных гармонических функций. Сами эти функции являются решением простых однотипных задач, определяются только геометрией расчетной области и поэтому вычисляются один раз.

Сформулирована задача, решение которой дает распределение завихренности по обтекаемому контуру. Стандартные процедуры конечно-разностной или конечноэлементной дискретизации этой задачи приводят к формулам граничных условий Дирихле для вихря того же порядка точности, что и при аппроксимации основных уравнений.

Применение данных подходов к постановке граничных условий практически не увеличивает вычислительные затраты, однако существенно расширяет класс задач, которые могут быть решены в рамках модели Навье-Стокса в переменных функция тока-вихрь.

## **КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ФЛУКТУАЦИЙ В АНИЗОТРОПНЫХ ЖИДКОСТЯХ ВЫШЕ ПОРОГА ТЕРМОКОНВЕКЦИИ**

**Наиль Г. Мигранов**

Башкирский государственный педагогический университет  
3-А, ул. Октябрьской Революции, 450000 Уфа, Россия

Гидродинамические флуктуации вблизи точки бифуркации горизонтального слоя обычной жидкости, нагреваемого снизу, рассматривались ранее в работе Грэма [1]. Мы рассматриваем задачу, связанную с анизотропной жидкостью, для описания которой вводится единичный вектор  $\mathbf{n}$ , который представляет собой усредненное направление длинных осей органических молекул, составляющих эту анизотропную жидкость. В данной работе мы рассматриваем планарную ориентацию вышеупомянутых молекул когда молекулы лежат в плоскости параллельной пластинам, ограничивающим слой жидкости и имеют преимущественное направление вдоль оси  $Ox$ . Типичным представителем таких жидкостей являются жидкие кристаллы. Несмотря на разнообразие жидких кристаллов: нематических, холестерических и смектических все они во внешних полях выше пороговых образуют диссипативных структуры. Возрастающий интерес к анизо-

тропным жидкостям связан с успехами по обнаружению огромного разнообразия новых эффектов в жидких кристаллах. Такой прогресс в большей степени произошел вследствие появления жизнеспособной макроскопической теории и необходимостью разработок технических приборов. Запутанное механико-тепловое взаимодействие между потоками, температурой и ориентацией оси анизотропии в жидких кристаллах приводит к возможности появления эффектов, не наблюдаемых в обычной жидкости. Как результат возможны появления гидродинамических неустойчивости и при нагреве жидких кристаллов сверху наряду с традиционной задачей Бенара, когда нагрев идет снизу. Более того возможны колебательные конвективные неустойчивости с обратными бифуркационными и гистерезисными эффектами. В работе мы предполагаем, что конвекция образуется в виде двумерных роллов. Директор  $\mathbf{n}$ , описывающий анизотропию жидкости в нашей проблеме рассматривается как полноправная переменная наряду с другими гидродинамическими переменными. Вспомним, что вблизи порога неустойчивости гидродинамика (в приближении Бессенеска) значительно упрощается появлением медленно изменяющейся комплексной амплитуды  $\mathbf{w}$ , чье абсолютное значение и фаза описывают интенсивность и положение конвективных роллов. Обобщая предыдущие исследования, сделанные Грэмом в [1] для обычных жидкостей, и развивая его идеи дальше, как например для электрических полей [2], нами было получено приближенное уравнение движения медленной амплитуды образца нематического жидкого кристалла. Новым в нашем анализе было включение в анизотропную жидкость флуктуационных членов, которые приводят к индетерминированному уравнению Ланжевена. Предполагается, что флуктуации удовлетворяют принципу детально равновесия. Соответственно вводится Обобщенный Термодинамический Потенциал (ОТП) или другое название – функционал Ляпунова. ОТП является функционалом медленной амплитуды  $\mathbf{w}$ , которая играет роль параметра порядка перехода. Дается дальнейшая оценка гидродинамических флуктуаций для безграничного в плоскости XOY слоя нематика вблизи точки Бенара с использованием ОТП при соответствующих приближениях. Для строго двумерных потоков (когда отсутствует зависимость от одной из горизонтальных переменных) и для стационарных состояний удастся рассчитать когерентные длины возмущений, связанных с флуктуациями, без каких-либо дополнительных упрощений. Мы использовали квазилинейную аппроксимацию для описания динамических свойств (были опре-

делены когерентные времена) системы и трехмерных флуктуаций. Было показано, что большие и долгоживущие флуктуации компонент директора, скоростей потока и температуры появляются при определенных значениях критического волнового числа вблизи конвективной неустойчивости.

### Литература

[1] Graham R. 1974, Phys. Rev. Ser.A. - **10**, N 5, p.1762.

[2] Мигранов Н.Г., 1996, Гидродинамические флуктуации и диссипативные структуры в нематических жидких кристаллов Уфа. Изво: УНЦ РАН 133 стр.

## NUMERICAL SIMULATION OF VISCOSITY SEPARATED FLOW PAST A ROTATING CIRCULAR CYLINDER

**Irina V. Morenko, Alexander B. Mazo**

Institute of Mechanics and Engineering Kazan Science Center  
Russian Academy of Sciences,  
2/31, Lobachevsky str., 420111 Kazan, Russia

The viscosity incompressible fluid flow past a circular cylinder with the rotational degree of freedom is calculated by means of the unsteady stream function-vorticity-pressure Navier-Stokes equations. The flow field, drag and lift coefficients in dependence on both Reynolds number and cylinder rotating rate are evaluated by the finite-element method.

The Reynolds number is varied in the range from 70 to 150, when the Karman vortex street is formed in the wake past a cylinder and the two-dimensional model is adequate to this type of fluid flow. The numerical algorithm testing showed good accordance with experiment and numerical data obtained by other researchers.

Following flow regimes were studied: steady cylinder; given speed rotating; interaction between the flow and unsubstantial or inertial rotating cylinder.

The values of Strouhal number, drag and lift coefficients, amplitude of the tangential stress, rotating speed in dependence on Reynolds number were obtained. The suppression of periodic vortex shedding with cylinder rotating were studied in the numerical simulation.



# **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОГО ОТРЫВНОГО ОБТЕКАНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА**

**Ирина В. Моренко, Александр Б. Мазо**

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра  
Российской академии наук

2/31, ул. Лобачевского, 420111 г. Казань, Россия

Для описания движения вязкой несжимаемой жидкости вокруг кругового цилиндра с вращательной степенью свободы используются нестационарные уравнения Навье-Стокса в переменных функция тока – вихрь – давление. Методом конечных элементов рассчитывается картина течения, коэффициенты сопротивления и подъемной силы в зависимости от числа Рейнольдса и скорости вращения цилиндра.

Число Рейнольдса варьировалось в диапазоне от 70 до 150, когда в следе за цилиндром формируется вихревая дорожка Кармана, а движение жидкости корректно описывается двумерной моделью. Тестирование численного алгоритма показало хорошее согласие с имеющимися экспериментальными и расчетными данными других авторов.

Исследованы различные режимы обтекания: неподвижный цилиндр; вращение с заданной скоростью; взаимодействие потока с невесомым и инерционным цилиндром, имеющим вращательную степень свободы.

Получены зависимости числа Струхалия, коэффициентов сопротивления, амплитуды касательных напряжений, угловой скорости вращения от числа Рейнольдса. Проведено численное моделирование подавления периодического срыва вихрей при вращении.

## **LONG CAVITIES IN COMPRESSIBLE LIQUID AND PROBLEM OF DRAG REDUCTION**

**Ihor Nesteruk**

Institute of Hydromechanics, NASU, Kyiv, Ukraine

2D and axisymmetric flows with slender cavities in compressible homogeneous liquids at large Reynolds numbers are investigated with the use of the linear and non-linear theories. The paper consists of 4 Sections:

1. Possible shapes of slender steady axisymmetric cavities in ideal incompressible fluid are analyzed by means of the first approximation equation [1]

$$R^2 = \frac{\sigma x^2}{2 \ln \varepsilon} + 2\beta x + 1, \quad (1)$$

where  $\beta$  is the derivative of the radius at the cavity origin point  $x = 0$ ,  $\varepsilon$  is the thickness parameter (for example, for the conical cavitator  $\varepsilon = \beta$ ). Eq. (1) is the same for both subsonic and supersonic flows [2]. It was shown that cavities can be not only elliptic but also hyperbolic. The corresponding regions of cavitation number  $\sigma$  are found, see also [3]. The most interesting are concave cavities, which need no closing rigid body. An example was calculated in [3] with the use of non-linear approach [4], see Fig. 1. The examples of concave axisymmetric cavities for the case of partial cavitation are calculated, see [5] and Fig. 2.

2. Peculiarities of 2D supersonic flows with free boundaries are investigated with the use of the Ackeret theory, see [6]. It was shown that slender plane cavity is almost straight (in comparison with the convex shapes in the subsonic case). The shape of the supersonic cavitator must be conformed to the cavitation number. The relationships between the cone angle and the Mach number at different values of the cavitation number are calculated, which ensure a subsonic supercavitating flow. Other values of parameters can cause the cavitation inside the liquid. The lift and pressure drag forces of cavitating cone wing are estimated. This wing can ensure better hydrodynamic efficiency in comparison with the traditional unseparated profiles.

If an underwater device is covered by the cavity shown in Fig.1 and its second part ( $x > 0$ ) is close to the cavity shape, its pressure drag have to be near to zero (due to D'alambert paradox). Only the friction in the boundary-layer determines the body drag.

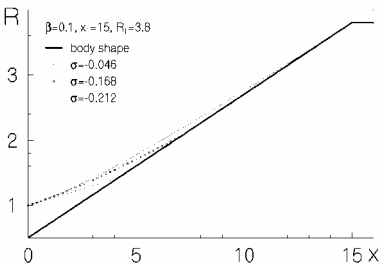


Fig.1 Axisymmetric cavitator ( $x < 0$ ) and cavity ( $x > 0$ ). Shape and pressure distribution.

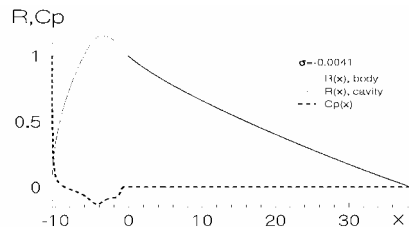


Fig 2. Partial cavities after a cone (located at  $x < 0$ ) with  $\beta = 0.1$  for different cavitation numbers.

3. This fact differs this device from bodies located in cavities after a disk or a cone, which have a significant pressure drag. The comparison of the volumetric pressure drag of these standard supercavitating bodies (located in cavities after a disk or a cone) with the volumetric friction drag of shapes without separation and cavitation (see [3,7,8]) shows that unseparated shapes are preferable for the volumetric Reynolds number  $Re_v > 10^7$ . For example, with  $V = 0.5m^3$ ,  $U_\infty = 100m/s$  the value of  $Re_v$  is  $6.1 \cdot 10^7$  ( $\nu = 1.3 \cdot 10^{-6} m^2/s$ ). Therefore, in this case a disk or a conical cavitator cannot cover a body of small volumetric drag (in comparison with the shape without separation and cavitation).

Nevertheless, the advantage of cavitation can be used with bodies shown in Fig.1, since they have near to zero pressure drag (such as unseparated shapes), but their friction drag is smaller (in comparison with the unseparated shapes) due to the smaller area of contact with the water. To estimate the values of this advantage, the following formulae can be used for the laminar boundary-layer, [7]:

$$C_{dV} = \frac{4.708}{\sqrt{Re_v}} \sqrt{\frac{V_b}{V}} \quad (2)$$

and for the turbulent one: 
$$C_{dV} = \frac{0.073 V_b^{6/7}}{Re_v^{1/7} V^{13/21}} \quad (3)$$

where  $V_b$  is the volume of the part wetted by water (in Fig.1 this part is located at  $x < 0$ ).

For example, for body shown in Fig. 1 ( $V_b = 2.6 \cdot 10^{-4}$ ,  $V = 5.5 \cdot 10^{-4}$ ), eq. (2) gives the drag diminishing of 31% (in comparison with the unseparated flow pattern  $V_b = V$ ). For the pure turbulent boundary-layer (eq. (3)) the advantage is 47%. Eq. (3) yields the estimation  $C_{dV} \approx 5 \cdot 10^{-4}$  for the body shown in Fig.1. This value is 14 times less than the volumetric drag of the underwater apparatus ‘‘Dolphin’’ measured at  $Re_v = 8.5 \cdot 10^6$  (see [9]). The diminishing  $V_b/V$  leads to the drag reduction. Nevertheless, short cavitators have more deep pressure minimum at their surface. This fact can cause separation (and cavitation) upstream to the point  $x = 0$  and another flow pattern with a large pressure drag.

4. The investigation of separation behavior is very important not only for the configuration shown in Fig.1. The unseparated flow pattern diminishes the total drag of vehicles moving both in liquid and in gas. The flow without separation can be achieved with the use of a special pressure distribution on the surface. The results of theoretical investigations and wind tunnel tests, presented in [10-13], are reviewed. Progress in design of the axisymmetric unseparated shapes aroused interest in appropriate 2D forms. Symmetric profiles similar to the axisymmetric bodies have been obtained in [14] with the use of the exact solution for an inviscid incompressible fluid.

The unseparated flow patterns can prevent the cavitation inception too, [12,15]. The investigation presented in [15] seems to be a pure experiment proving the fact that separation is the main reason of cavitation. Therefore, the shapes with a special pressure distribution can prevent both separation and cavitation. Tests a water tunnel have to be carried out to investigate the cavitation inception characteristics and to prove the existence of the unseparated flow pattern at higher Reynolds numbers. The next stage could be the experimental investigation of presented hydrofoils in radial pumps.

### References

1. Nesteruk I., 1979, "Investigation of Slender Axisymmetric Cavity Form in Fluid with Gravity", *Izv. AN SSSR, MFG*, 6: 133-136.(in Russian).
2. Nesteruk I., 1989, "Body forms of minimal drag", *Dopovidi AN Ukr.SSR, ser. A*, 4: 57-60. (in Ukrainian).
3. Nesteruk I., 2004, "Partial cavitation on long bodies", *Prykladna gidromekhanika (Applied Hydromechanics)*, Kyiv (to be published in Ukrainian).
4. Nesteruk I., 2003, "Simulation of axisymmetric and plane free surfaces by means of sources and doublets", *Applied Hydromechanics*, Kyiv, 5(77), No. 2: 37-44. (in Ukrainian).
5. Nesteruk I., 2003, "Influence of the flow unsteadiness, compressibility and capillarity on the long axisymmetric cavities", *Fifth International Symposium on Cavitation (Cav2003)*, No. GS-6-004, P.1-13.
6. Nesteruk I. and Savchenko Yu. M., 2004, "Peculiarities of plane supersonic flows with free boundaries", *Dopovidi NASU* (to be published in Ukrainian).

7. Buraga O.A., Nesteruk I. and Savchenko Yu. M., 2002, "Comparison of the slender axisymmetric bodies drag by unseparated and supercavitation flow patterns", *Prykladna gidromekhanika (Applied Hydromechanics)*, Kyiv, 4(76), No. 2: 3-8. (in Ukrainian).
8. Nesteruk I., 2003, "Drag calculation of slender cones using of the second approximation for created by them cavities", *Prykladna gidromekhanika (Applied Hydromechanics)*, Kyiv, 5(77), No. 1: 42-46. (in Ukrainian).
9. Lorant M., 1968, "Investigation into High-Speed of Underwater Craft", *Nautical Magazine*, v.200, No.5, pp. 273-276.
10. Nesteruk I., 2000, "Experimental Investigation of Axisymmetric Bodies with Negative Pressure Gradients", *Aeronautical Journ.*, v. 104: 439-443.
11. Nesteruk I., 2002, "The Problems of Drag Reduction in High Speed Hydrodynamics", *The International Summer Scientific School "High Speed Hydrodynamics"*, June 16-23, 2002, Cheboksary, Russia.- P. 351- 359.
12. Nesteruk I., 2003, "Can Shapes with Negative Pressure Gradients Prevent Cavitation", *Proceedings of FEDSM'03, 4<sup>th</sup> ASME\_JSME Joint Fluids Engineering Conference*, Honolulu, USA, July 6-11, 2003, No. FEDSM2003-45323.
13. Nesteruk I., 2003, "New type of unseparated subsonic shape of axisymmetric body", *Dopovidi NASU*, No. 11, pp. 49-56. (in Ukrainian).
14. Nesteruk I., 2001, "Plane Subsonic Forms with Negative Pressure Gradients on the Surface", *Dopovidi NASU*, **9**, pp. 63-68. (In Ukrainian).
15. Takahashi S., Washio S., Uemura K. and Okazaki A., 2003, "Experimental study on cavitation starting at and flow characteristics close to the point of separation", *Fifth International Symposium on Cavitation (Cav2003)*, Osaka, Japan, No. Cav03-OS-3-003, pp. 1-8.

**NANOSCALE BUBBLE THERMONUCLEAR FUSION  
IN ACOUSTICALLY CAVITATED DEUTERATED LIQUID**

**Robert I. Nigmatulin**

Ufa Scientific Center of RAS , Ufa, Russia  
6, K. Marx Street, 450077 Ufa, Russia

It has been experimentally shown (Taleyarkhan, West, Cho, Lahey, Nigmatulin, Block, 2002, 2004) that neutron emission and tritium forma-

tion may occur in deuterated acetone under acoustic cavitation conditions. This suggests ultrahigh compression of matter produced inside bubbles during their collapse. Systematic research is being carried out on vapor bubble implosion in intense acoustic fields in D-acetone and D-benzol to give the observed effect theoretical confirmation and explanation. The dynamics of bubbles formed during maximum rarefaction in the liquid is numerically studied on the basis of the developed models of a single bubble and bubble clusters. It is supposed that during their growth the bubbles coagulate and form one bigger bubble, which then collapses under the action of additional pressure pulses produced in the liquid through the intensification of acoustic waves within the cluster. A shock wave is shown to be formed inside the bubble during the latter's rapid contraction. Focusing of this shock wave in the bubble center results in violent increases in density ( $10^4 \text{ kgm}^3$ ), pressure ( $10^{10}$ - $10^{11}$  bar) and temperature  $10^8$ - $10^9$  K), high enough to produce nuclear fusion reactions. The diameter of the neutron emission zone is about 100 nm. The highest neutron emission is recorded at about 10 nm from the bubble center. The number of neutrons emitted during the implosion of a single bubble is 0.1-10 neutrons per implosive collapse. It is found out that the intensity of bubble implosion and the number of neutron emitted increase with variations in nucleation phase, positive half-wave amplitude, liquid temperature and also with the involvement of coagulation mechanisms within the cluster during the bubble simultaneous growth.

## **ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ В СХЛОПЫВАЮЩИХСЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПАРОВЫХ ПУЗЫРЬКАХ**

**Роберт И. Нигматулин**

Институт Механики Уфимского научного центра РАН  
6, ул. К. Маркса, 450 000 Уфа, Россия

В Оук-Риджской Национальной (ядерной) Лаборатории (Теннесси, США) по предложению автора данного доклада были проведены эксперименты с ультразвуковой акустической кавитацией дейтерированного ацетона с образованием пузырькового кластера. Частота ультразвука ( $\omega = 2\pi \times 20$  КГц) соответствовала акустическому резонансу цилиндрического сосуда (диаметр  $D = 65$  мм) с жидкостью. В моменты периодического сжатия пузырькового кластера зафиксированы сонолюминесцентные вспышки света и излучение быстрых нейтронов

(2,5 МэВ) с интенсивностью  $\sim (4 - 7) \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ . Примерно с такой же интенсивностью зафиксировано производство ядер трития. Это, по мнению авторов (R. Nigmatulin, R. Lahey, R. Taleyarkhan, C. West, R. Block), является следствием термоядерной реакции синтеза дейтерий – дейтерий. Экспериментальные данные и их теоретический анализ, проводимый группой из Института механики УНЦ РАН, после длительного обсуждения в Оук-Ридже и тщательного рецензирования были опубликованы в журнале «Science» в марте 2002 года. Два сотрудника Оук-Риджа (D. Shapira и M. Saltmarsh) критиковали нашу систему измерений потока нейтронов и оценивали интенсивность нейтронов на два-три порядка меньшей. Недавно журнал Physics Review (E) после длительного рецензирования принял нашу вторую статью с дополнительными более точными измерениями нейтронного потока с энергией 2,5 МэВ, в которой подтверждается наш предыдущий результат ( $\sim 4 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ ). Статья прошла открытое рецензирование 25 специалистами Оук-Риджа и 4 закрытыми рецензентами журнала.

После выхода первой статьи в журнале «Science» мы (в качестве пленарных или приглашенных лекторов) докладывали экспериментальные измерения, а автор настоящего доклада и их теоретический анализ на ряде совещаний и конференций. В частности, мы докладывали на годичной сессии Американского ядерного общества (Майами, Флорида, США, 2002), на III Международном симпозиуме по процессам переноса в двухфазных средах (Кельце, Польша, 2002), на IV Конференции Евромех по нелинейным колебаниям (Москва, 2002), на XVI Международном симпозиуме по нелинейной акустике (Москва, 2002), на 145-й конференции Американского акустического общества (Нэшвилл, Теннесси, США, 2003), на специальном совещании по перспективам сонолюминесценции и сонотермояду в Агентстве по перспективным оборонным проектам (DARPA) (Арлингтон, Вирджиния, США, 2003). Автор настоящего доклада представлял результаты экспериментов и их теоретический анализ также в российских ядерных центрах (Институт им Курчатова (2000), Снежинск (2000, 2002), Дубна (2002)) и семинарах по механике (Съезд по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001), Институт механики МГУ (2002), Институт проблем механики РАН (2002), Бюро Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН (2003)).

В данном докладе излагается схема эксперимента и теоретический анализ процесса расширения (в стадии отрицательного акустического давления) и схлопывания (в стадии положительного акустиче-

ского давления) парового кавитационного пузырька с использованием уравнений газовой динамики, тепло- и массообмена, диссоциации и ионизации с уравнениями состояния жидкости, пара и плазмы в широком диапазоне давлений  $p$  от 0 до  $10^{11}$  бар и температур  $T$  от  $10^2$  до  $10^8$  К и кинетики ядерной реакции синтеза дейтерий – дейтерий. Уравнение состояния сжатого ацетона получено на основе экспериментальной ударной адиабаты, полученной Р. Труниным (1992).

Анализ показал, что условия для термоядерной реакции реализуются в центральном ядре схлопывающегося пузырька, радиус которого  $r \approx 50 - 80$  нм. Эта зона образуется за счет кумуляции ударных волн, инициированных сходящейся жидкостью. Интенсивность инициируемых ударных волн сильно зависит от нелинейной сжимаемости жидкости на межфазной границе. При этом жидкость на межфазной границе находится при высоком давлении  $p \sim 10^5$  бар в течение времени  $t \sim 10^{-9}$  с. За это время жидкость сохраняет свою молекулярную структуру, т.к. для «холодной» диссоциации молекул жидкости требуется время  $t \sim 10^{-7}$  с. Сохранение молекулярной структуры жидкости в течение указанного короткого времени, в течение которого жидкость (как поршень) инициирует ударную волну в паре, обеспечивает ее относительно повышенную ударную жесткость (меньшую сжимаемость по сравнению с жидкостью с равновесной диссоциацией). В результате ударная волна в паре является гораздо более сильной, чем, если бы она инициировалась равновесно диссоциирующей (под действие высокого давления) жидкостью.

Максимальное производство нейтронов и трития происходит в центральной зоне микропузырька радиусом  $r^* \approx 10 - 20$  нм. Характерные значения параметров в этой зоне равны: ионная температура  $T_i^* \sim 10^8$  К, плотность  $\rho^* \sim 10^2$  г/см<sup>3</sup> и давление  $p^* \sim 10^{11}$  бар и длится это состояние суперсжатия в течение времени  $t^* \sim 10^{-13}$  с. За это сверхкороткое время электронный газ не успевает нагреться ионным газом и забрать на это значительную энергию ионов, что позволяет достичь указанной высокой температуры ионов.

Расчеты показывают, что в указанных условиях образуется примерно  $10^1 - 10^1$  нейтронов за коллапс микропузырька. В экспериментах удается обеспечить около  $10^4$  коллапсов в секунду со световыми вспышками, а в кластере имеется около  $10 - 10^2$  коллапсирующих микропузырьков. Поэтому расчеты согласуются с измеренным потоком термоядерных нейтронов и интенсивностью образования ядер трития.



Расчеты показывают значительные ресурсы сохранения сферически-симметричной кумуляции микропузырьков, чем это следует из традиционного анализа устойчивости.

В докладе обсуждаются перспективы интенсификации ядерно-физических процессов в схлопывающихся пузырьках, чтобы они стали «микроводородными бомбами» или источником быстрых нейтронов.

## **SOME ISSUES OF UNSTEADY BODY PLANING**

**Emil V. Paryshev**

Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N.E. Zhukovsky  
Moscow Branch “Moscow Complex of TsAGI”  
17, Radio str., 107005 Moscow, Russia

The planing of a body of revolution along a curvilinear disturbed liquid surface is considered. Solution of the planar problem for immersion of an expanding cylinder through circular liquid boundary which radius varies in time is used. The planar cross sections method is applied to determine hydrodynamic forces acting on the body, with account for specific difference between the planing over a curvilinear surface form that over flat undisturbed one.

## **НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГЛИССИРОВАНИЯ ТЕЛ**

**Эмиль В. Парышев**

Филиал ФГУП ЦАГИ “Московский комплекс ЦАГИ”  
17, ул. Радио, 107005 Москва, Россия

Рассматривается глиссирование тела вращения по криволинейной возмущенной поверхности жидкости. Используется решение плоской задачи о погружении расширяющегося цилиндра через круговую границу жидкости переменного радиуса. Для определения действующих на тело гидродинамических сил применяется метод плоских поперечных сечений с учетом особенностей, отличающих глиссирование по криволинейной границе от глиссирования по невозмущенной поверхности воды.

## **ASYMPTOTIC LAW OF AXISYMMETRIC STREAMLINES AT INFINITY**

**Alexander G. Petrov**

Institute of problems in mechanics of the russian academia of science  
101/1, Vernadsky pr., 119526 Moscow, Russia

N. Levinson (1946) and M. Gurevich (1947) independently of one another find asymptotic of infinity cavity behind an axially symmetric nose moving through an ideal fluid. M. Gurevich obtain the drag of cavitator as well.

Levinson proceeded from the integral identity for a harmonic function and the condition of velocity constancy at a free boundary. He succeeded in obtaining the next term in the asymptotic expansion. Gurevich reduced the problem to the determination of the boundary of a semi-infinite finite-drag body and not only obtained asymptotics but also established the relation between the coefficient and the force acting on the semi-infinite body which is absent in the Levinson's study.

The following expression terms in the asymptotic law are unknown.

In this study the integro-differential equation for a free jet is derived and its exact integral is obtained using the variational asymptotic theory for thin cavities. Employing this integral a one-parameter family of the solutions of this equation is constructed. The family parameter is expressed in terms of the force. The equation and the asymptotic expansion obtained are independent of the cavitator shape, are in this sense as accurate as possible, and refine appreciably the existing expansions. Further improvements will depend on the shape of the body in a flow.

## **АСИМПТОТИЧЕСКИЙ ЗАКОН РАСШИРЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СТРУЙ**

**Александр Г. Петров**

Институт проблем механики РАН  
101, корп. 1, пр.Вернадского, 119526 Москва, Россия

Для осесимметричной задачи кавитационного обтекания Левинсон (1946) и Гуревич М.И. (1947) независимо установили асимптотический закон расширения границы (струи), на которой скорость постоянна и равна скорости на бесконечности. Левинсон исходил из ин-

тегрального тождества для гармонической функции и условия постоянства скорости на свободной границе. Из-за чрезвычайной сложности такого подхода следующие члены разложения таким способом найти не удается. Нет также возможности вычислить силу

сопротивления. Подход же Гуревича позволяет вычислить силу, действующую на кавитатор, путем применения закона количества движения к полубесконечному телу конечного сопротивления, однако также не позволяет находить следующие члены разложения в асимптотическом законе струи.

В работе дан вывод интегро-дифференциального уравнения полубесконечной свободной границы. Найден его точный интеграл и построено одно-параметрическое семейство его асимптотических разложений, существенно уточняющих закон Гуревича-Левинсона. С помощью вариационного принципа параметр семейства выражен через силу, действующую на кавитатор. Уравнение и полученное решение не зависят от формы кавитатора, и в этом смысле являются максимально точными. Дальнейшие уточнения уравнения уже будут зависеть от формы обтекаемого тела.

## **CREATION OF SOFTWARE AND RESEARCH COMPLEX FOR SOLUTION OF MATHEMATICAL SIMULATION PROBLEMS**

Alexey A. Rosenman

State Aviation Technical University of Ufa

12, K. Marx st., 450000 Ufa, Russia

One of the key problems of the modern science is to improve the efficiency of mathematical simulation methods, to develop software, combining analytical solutions and computational experiment.

At present the mathematical simulation problems are solved by means of such mathematical packets, as MathCAD, Mathematica, Maple and some others. However, no matter how good they are, there exists the number of reasons, making it impossible, inconvenient or unjustified to use them for computational experiment support: the estimate of results accuracy, free access to the data from outside programs, the use of programs, written in other problem-oriented languages.

The paper touches upon the problem of information support of experiment. The lack or excess of information, intermediary experiments and

large amount of similar projects makes it very difficult for an investigator to estimate and process the results of numerical experiments to the full extent.

The given work aims at the development of software complex, allowing to make these processes much simpler, clearer and more convenient. At the same time such complex shouldn't lose its functionality and flexibility.

The complex was tested by the numerical solution of the problem of weighable fluid flow past the dipole.

Since the existing software complexes are closed system, the researcher is somehow limited in his studies. The computational methods in these software programs are hidden, therefore, the accuracy of the results remains unknown.

Quite another variant of action is when different means are used for the solution of different tasks. In this case we are able to control the computation process and calculation accuracy. However, in this case, the problem of results of various formats and the program codes storage comes up.

The given work presents the attempt to create the shell, which enables to lift the restrictions of one or another program package and, at the same time, to provide the access to the required input data, results and program code.

The main objective of the created complex is to increase flexibility and efficiency of computational experiment, improve the quality level of results representation, as well as the level of investigation process automatization. The conducted analysis allowed to determine and create the basic models of information processes.

Thus, the following work levels are available:

- Level of project groups;
  - Projects can be combined into groups according to various criteria. This permits to facilitate the search and record of the existing projects.
- Level of current project;
  - Each project consists of three sections: the program solver code, files of input data, files with the obtained data. The project can be realized with the help of any problem-oriented language; the user can choose the required editor or shell program of the problem language itself as well.
- Data acquisition;
  - If the solver program was compiled, the user can run this program with the required input data and obtain the results.

- Data processing, including the application of various extrapolation methods (and the corresponding programs), the control of the data coincidence with those, obtained by other methods.

When solver program completes its tasks, the results automatically become available for the further work.

The data can be presented in the form of tables, pictures and graphs, which in their turn may be displayed on the screen, saved in files or printed out.

## **СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Алексей А. Розенман**

Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет  
12, ул. К.Маркса, 450000 Уфа, Россия

Одна из ключевых проблем современной науки — повышение эффективности методов математического моделирования, разработка средств оптимального сочетания аналитических решений и вычислительного эксперимента.

Для численного решения задач математического моделирования в настоящее время используются следующие математические пакеты: MathCAD, Mathematica, Maple и некоторые другие. Однако, при всех несомненных достоинствах этих универсальных программных продуктов, существует ряд причин, делающих невозможным, неудобным или неоправданным их использование для обеспечения вычислительного эксперимента: проблема оценки точности полученных результатов; проблема свободного доступа к данным из сторонних программ; проблема использования программ, написанных на других проблемно-ориентированных языках.

В работе затрагивается проблема информационного обеспечения вычислительного эксперимента. Недостаток или избыток информации, промежуточные эксперименты, множество сходных проектов часто не позволяет исследователю быстро и полноценно оценить результаты, полученные в ходе численного эксперимента.

Целью настоящей работы является разработка инструментария, позволяющего сделать этот процесс проще, нагляднее и удобнее, при

этом не потерять функциональность и гибкость программного обеспечения.

Тестовым примером, с помощью которого проводилось испытание программного комплекса, являлось численное решение задачи обтекания диполя потоком весомой жидкости.

Существующие пакеты программного обеспечения, являясь закрытыми системами, не могут обеспечить исследователя достаточной свободой действий, при этом часто неизвестной остается точность, с которой получен результат, что является неприемлемым. Эти программные продукты не дают возможности произвести оценку погрешности полученных результатов, поскольку методы вычислений остаются скрытыми от пользователя.

Альтернативным вариантом является использование для решения задач разных средств. В этом случае мы не имеем отдельной закрытой системы, а используем вычислительное средство, удобное для решения конкретной задачи (язык программирования). Однако при этом возникает проблема хранения результатов различных форматов и программного кода, которым порождены данные.

В данной работе была выдвинута идея создания оболочки, которая позволяет снять ограничения, накладываемые тем или иным программным пакетом, и этим предоставить определенные удобства для исследований, возможность доступа к требуемым исходным данным, результатам, а также к программному коду.

Основной целью создания данного комплекса является повышение гибкости и эффективности проведения вычислительного эксперимента исследователем, повышение качественного уровня представления результатов, а также уровня автоматизации рабочего процесса исследователя. На основании анализа были определены и созданы основные модели информационных процессов.

Итак, пользователь имеет возможность работать на следующих уровнях:

- уровень групп проектов;
  - проекты могут объединяться в группы по какому-либо критерию. Это позволяет облегчить поиск и учет существующих проектов.
- уровень текущего проекта;
  - каждый проект состоит из трех разделов: программный код решателя, файлы начальных данных, файлы с полученными данными. Проект может быть реализован на любом проблемно-

ориентированном языке, при этом пользователь может выбрать удобный для него редактор, или программу-оболочку самого проблемного языка.

- получение данных;
  - если программа-решатель была откомпилирована, то пользователь может запустить её с требуемыми начальными данными и получить результат.
- обработка данных, включающая применение различных методов (и реализующих их программ) экстраполяции, проверки на наличие рассогласования с данными, полученными другими способами.

По окончании работы программы-решателя, полученные результаты автоматически становятся доступными для дальнейшей работы. Данные могут быть представлены в виде таблиц, рисунков и графиков, которые в свою очередь могут быть выведены на экран, в файл или принтер.

## **ESTIMATION OF PERSPECTIVES FOR DEVELOPMENT OF FAST SPEED WATERBORNE TRANSPORTATION BASING ON THE EXPERIENCE OF DESIGN AND EXPLOITATION OF RUSSIAN FAST SPEED VEHICLES.**

**Alexander A. Rusetsky**

Krylov Shipbuilding Research Institute  
44, Moskovskoe Shosse, 196158 St. Petersburg, Russia

Looking to general trends of increasing of ship speed the analysis of various hydrodynamic schemes was presented for resistance reduction by hydrofoils, artificial cavities, air support. It is estimated the limitation caused by natural cavitation and considered the aspects for separation of vehicles from water surface.

Analyzing the experience of Russian fast speed ship development the attention was paid to designing of foil system and propulsor for biggest and fasts Russian hydrofoils.

It is presented the results of investigation for designing of 60-knots ship with supercavitating hydrofoils, schemes with partial air support and finally wigs.

# **ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ СОЗДАНИЯ СКОРОСТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ ОПЫТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ БЫСТРОХОДНЫХ СУДОВ РОССИЙСКОГО ФЛОТА**

**Александр А. Русецкий**

ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова»,  
44, Московское шоссе, 196158 Санкт-Петербург, Россия

В условиях общей тенденции повышения скоростей транспортных средств анализируются особенности различных гидродинамических компоновок, обеспечивающих снижение сопротивления за счет применения подводных крыльев, искусственной кавитации, воздушной разгрузки. Оцениваются ограничения обусловленные естественной кавитацией и рассматриваются перспективы отказа от контакта с водной поверхностью.

Анализируется опыт исследований по созданию скоростных судов Российского Флота. Особое внимание уделено отработке крыльевых систем и движителей наиболее крупных и быстроходных судов на подводных крыльях.

Приводятся результаты исследований, направленных на создание кораблей со скоростями свыше 60 узлов, путем применения суперкавитирующих подводных крыльев, схем с воздушной разгрузкой и, в конечном счете, аппаратов использующих только воздушные крылья движущиеся вблизи экрана.

## **COMPUTER SIMULATION OF SUPERCAVITATION PROCESSES**

**Vladimir N. Semenenko**

National Academy of Sciences of Ukraine – Institute of Hydromechanics,  
8/4, Zhelyabov str., 03680 Kyiv-180, Ukraine

During years of time, a package of computer programs for the computer simulation of the unsteady supercavitation flows is being developed at the IHM NASU [1]. In these programs, the approximate mathematical model of an unsteady supercavity is used which is based on the *G.V. Logvinovich's* principle of independence of the cavity section expansion. The developed programs allow to reproduce the unsteady supercavi-



tation processes of following types on a computer screen: the supercavity evolution when both the model velocity and the model orientation vary; the supercavity reaction on the ambient water pressure perturbation; the artificial ventilated cavity evolution when changing or ceasing the gas-supply into the cavity; the self-induced oscillation of the ventilated cavities, *etc.*

The programs have an easy-to-use Windows interface and allow a User to perform “computer experiments in real time”. They may be used for practical designing the high-speed underwater models and vehicles moving in both natural and artificial supercavitation regimes and for educational purposes as well. In this paper, possibilities of the latest versions of three basic programs from the package are described, and some examples of their application are given.

1. The **SCAV, Version 2.3** program is intended to calculate a shape of the unsteady supercavities and the velocity variation of the high-speed supercavitating models moving on inertia under an arbitrary angle to the horizon or under an acting propulsor. A flow is considered to be axisymmetric, the motion is straight-line. The **SCAV** program allows to design a shape and mass of the high-speed supercavitating models in interactive regime “man-computer”, such that the model flies the desired distance and/or the model has the specified velocity at the finish. Some examples of solving the optimization problems of the high-speed supercavitating model motion with the different criterion functions are given.

2. The **STAB, Version 2.3** program is intended for computer simulation of the high-speed supercavitating model dynamics. The program includes the module for calculation of the hydrodynamic forces and moments acting at unsteady interaction between the model and the cavity wall. This module uses the information about mutual position and velocities of both the model body and the cavity boundaries. The program allows to investigate stability of the supercavitating model motion “as a whole” and to compute the real flight path of the model at specified starting perturbations. Examples of the computer simulation demonstrate a mechanism of the supercavitating model self-stabilization by the way of ricocheting the model tail from the cavity walls. We observed this stability mechanism experimentally [2].

3. The **ACAV, Version 2.3** program is intended for computer simulation of the unsteady processes of the ventilated cavity control. A problem of control of the ventilated cavities is the problem of maintaining the cavity dimensions or desired varying the cavity dimensions by regulating the gas-supply into the cavity. The program uses different laws of the gas-leakage

from the cavity in dependence on the cavitation number and the *Froude* number and when the cavity closes on a body. The calculation examples are given which demonstrate a characteristic lagging reaction of the cavity on the changing the air-supply rate and the transient oscillating processes caused by the elasticity of gas filling the cavity. Examples of simulating the process of stability loss and self-induced oscillation of the ventilated cavities at the extra gas-supply are given.

### References

1. Savchenko Yu.N., Semenenko V.N., Putilin S.I., Naumova Ye.I. Software package for computer simulation of supercavitating body motion in water // *Mathematical Machines and Systems*, 1999, No. 2, pp. 48-57 (in Russian).

2. Savchenko Yu.N., Semenenko V.N., Putilin S.I. Unsteady supercavitated motion of bodies // *Int. J. of Fluid Mechanics Research*, 2000, Vol. 27, No. 1, pp. 109-137.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУПЕРКАВИТАЦИИ

**Владимир Н. Семененко**

Национальная академия наук Украины – Институт гидромеханики  
8/4., ул. Желябова, 03680 Киев-180, Украина

В течение ряда лет в ИГМ НАНУ разрабатывается комплекс программ компьютерного моделирования нестационарных суперкавитационных течений, в которых используется аппроксимационная математическая модель нестационарной суперкаверны, основанная на принципе независимости расширения сечений каверны Г.В.Логвиновича [1]. Разработанные нами программы позволяют воспроизводить на экране компьютера нестационарные суперкавитационные процессы следующих типов: эволюция суперкаверн при изменении скорости движения и ориентации моделей; реакция суперкаверн на возмущения окружающего давления в воде; эволюция вентилируемых каверн при изменении поддува воздуха в каверну; автоколебания вентилируемых каверн, и т.д.

Программы имеют простой в использовании Windows-интерфейс и позволяют пользователю проводить “компьютерные эксперименты в реальном времени”. Они могут быть использованы при

практическом проектировании высокоскоростных подводных моделей, движущихся в режимах естественной и искусственной суперкавитации, а также в образовательных целях. В докладе кратко описаны возможности последних версий трех основных программ комплекса, приведены примеры их применения.

1. Программа **SCAV, Version 2.3** предназначена для расчета формы нестационарных суперкаверн и изменения скорости высокоскоростных суперкавитирующих моделей, движущихся по инерции под произвольным углом к горизонту, а также при работающем двигателе. Течение считается осесимметричным, движение – прямолинейным. Программа **SCAV** позволяет в интерактивном режиме “человек-компьютер” выбирать форму и массу модели из условия прохождения заданной дистанции и/или заданной скорости модели в конце дистанции. Приводятся примеры решения задач оптимизации движения высокоскоростных суперкавитирующих моделей при различном выборе целевой функции.

2. Программа **STAB, Version 2.3** предназначена для компьютерного моделирования динамики высокоскоростных суперкавитирующих моделей. Программа включает модуль расчета гидродинамических сил и моментов, действующих при нестационарном взаимодействии модели со стенкой каверны, который использует информацию о взаимном положении и скоростях относительного движения модели и границ каверны. Программа позволяет исследовать устойчивость движения суперкавитирующих моделей “в целом” и рассчитывать реальную траекторию моделей при заданных начальных возмущениях. Приведенные примеры компьютерного моделирования демонстрируют механизм самостабилизации высокоскоростных суперкавитирующих моделей путем рикошетирования хвостовой части модели от стенок каверны, который обнаружен нами экспериментально [2].

3. Программа **ACAV, Version 2.3** предназначена для компьютерного моделирования нестационарных процессов управления вентилируемыми кавернами. Задача управления вентилируемой каверной состоит в поддержании или изменении размеров каверны по заданному закону при изменении скорости модели путем регулирования поддува газа в каверну. Программа использует различные законы уноса газа из каверны в зависимости от значения чисел кавитации и Фруда, а также при замыкании каверны на теле. Приведены примеры расчетов, которые дают характерную запаздывающую реакцию каверны

на изменение расхода газа, а также переходные колебательные процессы, вызванные упругостью газа в каверне. Приведены примеры моделирования процесса потери устойчивости и возникновения автоколебаний вентилируемых каверн при избыточном поддуве.

#### **Литература**

1. Савченко Ю.Н., Семененко В.Н., Путилин С.И., Наумова Е.И. Программный комплекс компьютерного моделирования суперкавитационного движения тел в воде // Математические машины и системы. - 1999. - N 2. - С. 48-57.

2. Savchenko Yu.N., Semenenko V.N., Putilin S.I. Unsteady supercavitated motion of bodies // Int. J. of Fluid Mechanics Research, 2000, Vol. 27, No. 1, pp. 109-137.

### **SUPERCAVITATION FLOWS WITH GAS INJECTION: DRAG AND DRAG REDUCTION PROBLEMS**

**Vladimir V. Serebryakov**

Institute of Hydromechanics, National Academy of Sciences,  
8/4, Zheliabov Str., 03057 Kiev, Ukraine

The investigation results of the supercavitation with gas injection for high speed motion of prolate axisymmetric bodies in water are presented. The cavitation drag forming and drag reduction problems are considered on base studying of the peculiarities of the supercavitation flows for cavities with given pressure and with gas injections. Investigations are developed on the ground of the simple heuristic models, integral conservation laws, Slender Body Theory and another ordinary here approximations.

### **РАЗВИТЫЕ КАВИТАЦИОННЫЕ ТЕЧЕНИЯ С ИСКУССТВЕН- НЫМ ПОДДУВОМ: СОПРОТИВЛЕНИЕ И ВОПРОСЫ ЕГО УМЕНЬШЕНИЯ**

**Владимир В. Серебряков**

Институт гидромеханики Национальной Академии Наук Украины  
ул. Желябова 8/4, 03057 Киев, Украина

Представлены результаты исследований суперкавитации с искусственным поддувом при высокоскоростном движении в воде. Одними из основных являются вопросы формирования и уменьшения

кавитационного сопротивления и выработки возможно более общих критериев эффективности суперкавитационного движения. Основное внимание уделено продвижению уровня понимания проблемы в целом с учетом воздействия основных физических эффектов. Исследование основывается на применении простых эвристических моделей и зависимостей, интегральных законов сохранения, гидродинамики тонких тел и других приближений

## **SUB-, TRANS-, SUPERSONIC FLOWS IN WATER WITH SUPERCAVITATION**

**Vladimir V. Serebryakov\*, Guenter Schnerr\*\*,**

\*Institute of Hydromechanics of National Academy of Sciences of Ukraine  
8/4 Sheliabov Str., 03057 Kiev, Ukraine

\*\*Technical University of Munich,  
15, Boltzmannstrasse, D-85748 Garching, Germany

The paper contain analysis and advancing of the understanding level in the modern state of investigations as whole in new enough field of hydrodynamics for the super high sub- and supersonic speeds of the motion in water of prolate near to axisymmetric supercavitating bodies. The most important problems here from one hand are connected with appearance of key compressibility effects of water as compressible fluid for speeds compared with sonic speed in water  $a_0 \sim 1500\text{m/s}$ . This is shocks. wave resistance, transonic effects and i.e. Another number of the problems is connected with appearance for super high speeds super high hydrodynamics stresses which can be over as compared to strength point of the strongest steels. So here it is need to account of stresses deformation state of moving bodies including influence of hydro elastics effects, resonance and i.e.

The analysis base are ones of the hopeful and effective methods applied for development of classical supercavitation in incompressible fluid. This is application of simple heuristic model together with integral conservation laws, Similarity Theory, Slender Body Theory (SBT) on base Matched Asymptotic Expansion Method (MAEM) and another approximations usually used in the cavitation.

## **ДО-, ТРАНС-, СВЕРХЗВУКОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ВОДЕ С РАЗВИТОЙ КАВИТАЦИЕЙ**

**Владимир В. серебряков\*, Guenter Schnerr\*\*,**

\* Институт гидромеханики Национальной Академии Наук Украины  
8/4, ул. Желябова, 03057 Киев, Украина

\*\*Technical University of Munich

15, Boltzmannstrasse, D-85748 Garching, Germany

Доклад посвящен анализу и продвижению уровня понимания современного состояния исследований в целом в достаточно новой области гидродинамики - сверхвысоких до- и сверхзвуковых скоростей движения в воде удлиненных в частности близких к осесимметричным тел. Наиболее важные проблемы здесь, с одной стороны, связаны с проявлением основных эффектов сжимаемости воды как сжимаемой жидкости при скоростях движения сравнимых со скоростью звука в воде  $\sim 1500$  м/с. Это наличие скачков уплотнения, волнового сопротивления, трансзвуковых эффектов и др. Другой ряд рассматриваемых проблем связан с проявлением сверхвысоких гидродинамических напряжений при сверхвысоких скоростях, которые могут превосходить пределы прочности наиболее прочных сталей и соответственно необходимо учесть напряженно-деформированного состояния движущихся тел, включая гидро-упругие эффекты, резонансные явления и др. Основой анализа являются одни из наиболее надежных и эффективных методов зарекомендовавшие себя при разработке теории классической суперкавитации в несжимаемой жидкости. Это применение простых эвристических моделей совместно с интегральными законами сохранения, теории размерностей, гидродинамики тонких тел на основе метода сращиваемых асимптотических разложений и других приближений применяемых в кавитации.

## **HYDRODYNAMIC FORCE OF SUPERCAVITATING VEHICLE**

**Xu Sheng**

China ship scientific research center

P.o. box 116, Jiangsu Province, 214082 Wuxi, P. R. China

Supercavitating vehicle with high speed is becoming hot topic of hydrodynamics in the world. The paper is focus on hydrodynamic forces  $\square$  hydroballistics and cavitating phenomena in both experimental and theoretical ways.

The experiment is to study hydroballistics of free-run large scale supercavitating vehicle with booster. The objects of the test are (a) to validate the design outline of supercavitating vehicle; (b) to be certain the reliability of booster with delay-action fuse; (c) to compare the predictions of cavity shape and hydroballistics with test data.

The test results demonstrate that:

(a) Under nominal test velocity, the well fitting of supercavity with the vehicle inside shows that the successful prediction of cavity shape and design of vehicle configuration;

(b) The booster and delay-action fuse work well with high reliability. The equivalence of thrust with drag indicates the correctness of drag prediction and thrust design;

(c) When the supercavity is shortening as velocity decreasing, the trajectory of model with partial cavity may deflect violently.

On the basis of potential flow theory, an improved method is presented to determine the cavity shape and surface pressure distribution of test model with sub- and super- cavitation. Compared with experimental data, the method is valid, and is used for test model design.

## **GRAVITY FLUID FLOW PAST A BOAD WITH APPEARANCE OF A FREE VORTEX**

**Natalia M. Sherykhalina, Alexey A. Oshmarin**

The State Aviation Technical University of Ufa

12, K. Marx str., 450000 Ufa, Russia

A flow of ideal inviscid incompressible gravity fluid along a semi-infinite board with a fracture and formation a vortex nearby the fracture is under consideration. The flow is limited by free surface. The flows of solitary wave type are discussed.

The vector of fluid velocity  $V$  in modulo on the free surface is related to the ordinate  $y$  by the Bernoulli's equation.  $\text{Im}z=0$  on the board, where  $z=x+iy$  are the complex coordinates of points. The fluid flow is potential according to the assumptions, but it contains a point vortex. The problem solution can be found as the analytic functions of a complex variable  $z(\zeta)$ ,  $w(\zeta)$ , where  $\zeta$  is a parametric variable. The range of this variable is a semi-circle. The function  $w$  is the complex potential. The bounds of the flow are impenetrable and the area of flow in the plane of the complex potential is a

belt with the half-belt connected with it. This half-belt is an image of the flow domain closed around the vortex.

Let's consider the problem of flow around the vortex in a semicircle channel. In this case the area of flow coincides with the area on the parametrical variable plane, i.e.  $z=\zeta$ . In the problem solution with free vortex, the vortex must be in balance. Therefore the force, which acts to the vortex, must be equal to zero. After some algebra we have an equation without solution. So this problem does not have the equilibrium solutions.

In case the of flow around the vortex in a circle channel the area of flow is result of mapping  $\zeta_1 = \zeta^2$  of the semicircle  $\zeta$ . From the condition of the balance of a free vortex we obtain the unique solution of this problem, i.e. the parameters of vortex completely defined by external conditions.

The investigation of the problem of the flow of weightless fluid around the vortex shows that problem with the free vortex has not solution.

The problem is solved by the collocation method [1]. The Bernoulli's equation is fulfilled at the discrete points. Solving the problem by conformal mapping we seek the function  $z(\zeta)$  as the sum  $z(\zeta) = h[z_0(\zeta) + z_1(\zeta)]$ , where  $z_0(\zeta)$  is the solution of a similar problem for weightless fluid,  $z_1(\zeta)$  is a function, which are chosen to fulfill the Bernoulli's equation. The modified Levi-Chivita method [1] is applied to seek this function. The computations error is estimated by the improved Runge's rule. Besides, some parameters can be found analytically.

Coincidence of results which obtained by the two different methods is allows to say of reliability of the estimates.

The detailed results of numerical investigations demonstrate efficiency of the developed algorithms of the problem solution.

### References

[1] V. Zhitnikov, N. Sherykhalina, O. Sherykhalin, "Postcritical regimes in the nonlinear problem of vortex motion under the free surface of a weightable fluid", *Trans. from Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, v. 41, No. 1, 2000, Kluwer Academic/ Plenum Publishers, 0021-8944/00/4101-0062, p. 62-68, 2000.



## ОБТЕКАНИЕ ЩИТА ВЕСОМОЙ ЖИДКОСТЬЮ С ОБРАЗОВАНИЕМ СВОБОДНОГО ВИХРЯ

Наталья М. Шерыхалина, Алексей А. Ошмарин

Уфимский Авиационный Технический Университет  
12, ул. Карла Маркса, 450000 Уфа, Россия

Рассматривается течение идеальной невязкой весомой несжимаемой жидкости вдоль полубесконечного щита с изломом и образованием вихря вблизи излома. С одной стороны поток ограничен свободной поверхностью. Рассматриваются течения типа уединенной волны.

Вектор скорости  $V$  потока по модулю на свободной поверхности связан с ординатой  $y$  уравнением Бернулли. На щите  $\text{Im}z=0$ , где  $z=x+iy$  – комплексная координата точки. Поток жидкости, в соответствии с допущениями, потенциален, но содержит точечный вихрь. Решение может быть найдено в виде аналитических функций комплексного переменного  $z(\zeta)$ ,  $w(\zeta)$ , где  $\zeta$  – параметрическая переменная. Область изменения переменной  $\zeta$  – полукруг. Функция  $w$  – комплексный потенциал. Границы потока – непроницаемы, тогда областью потока на плоскости комплексного потенциала является полоса с присоединенной полуполосой. Эта полуполоса есть образ ограниченной области потока вокруг вихря.

Рассмотрим задачу обтекания вихря в полукруглом канале. В этом случае область течения совпадает с областью на плоскости параметрического переменного, т.е.  $z=\zeta$ . При решении задачи со свободным вихрем вихрь должен находиться в равновесии, поэтому сила, действующая на вихрь должна быть равна нулю. После проведения преобразований получаем уравнение, которое не имеет решений.

При обтекании вихря в круглом канале область течения получается из полукруга  $\zeta$  с помощью отображения  $\zeta_1 = \zeta^2$ . Из условия равновесия свободного вихря получаем, что задача имеет единственное решение, т.е. параметры вихря полностью определяются внешними условиями.

Рассмотрение задачи обтекания вихря потоком невесомой жидкости показывает отсутствие решения со свободным вихрем.

Задача о течении весомой жидкости решается методом коллокаций. Уравнение Бернулли выполняется в дискретных точках. Решение

ищется в виде функции  $z(\zeta)$ , представимой суммой  $z(\zeta) = h[z_0(\zeta) + z_1(\zeta)]$ , где  $z_0(\zeta)$  - решение аналогичной задачи для невесомой жидкости,  $z_1(\zeta)$  - функция, которая необходима для выполнения условия Бернулли. Для нахождения этой функции был применен видоизмененный метод Леви-Чивиты [1]. Ошибка вычислений определялась с помощью обобщенного правила Рунге. Кроме того, некоторые параметры течения могут быть найдены аналитически. Совпадение результатов решения двумя методами позволяет сделать вывод о достоверности полученных оценок.

В сообщении приводятся подробные результаты численных исследований, которые демонстрируют эффективность разработанных алгоритмов решения задачи.

### References

[1] V. Zhitnikov, N. Sherykhalina, O. Sherykhalin, "Postcritical regimes in the nonlinear problem of vortex motion under the free surface of a weightable fluid", *Trans. from Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, v. 41, No. 1, 2000, Kluwer Academic/ Plenum Publishers, 0021-8944/00/4101-0062, p. 62-68, 2000.

## THE APPLICATION OF THE EULER-LAGRANGE EQUATION IN THE BOUNDARY LAYER TO RESEARCH OF THE MAIN EQUATION FOR MOVEMENT OF THE BODY WITH VARIABLE MASS

**Victor A. Svyatskov**

Cheboksary Institute of the Moscow State Open University  
54, Marks str, 428000, Cheboksary, Russia

We shall enter designations:  $M$  - mass of a body at the moment of time  $t$ ,  $\bar{v}$  - absolute speed of a body at the moment of time  $t$ ,  $\bar{q}$  - absolute speed of a joining (separated) particle at the moment of time  $t$ ,  $\bar{F}$  - the main vector of the forces enclosed to a body at the moment of time  $t$ . The equation of movement of a body of variable mass in these designations looks like [1]:

$$M \frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{F} + (\bar{q} - \bar{v}) \cdot \frac{dM}{dt}, \quad (1)$$

Let in the equation (1)  $\bar{q} = const$ . Then

$$\frac{d}{dt}[M(\bar{v} - \bar{q})] = \bar{F}. \quad (2)$$

Not breaking a generality of the further reasonings, we suppose, that the body of variable mass moves rectilinearly. In this case the equation (1) is applied. We shall enter Lagrangian  $L = L(t, x, \dot{x})$  on the basis of which we shall describe movement of a body. We shall present Euler - Lagrange equation as

$$\frac{d}{dt}L_{\dot{x}} = L_x. \quad (3)$$

From structure of record of the equation (2) follows, that this equation has the form of the equation (3).

Let's accept according to work [2]

$$L_{\dot{x}} = M(v - q); \quad L_x = F, \quad (4)$$

where  $v = \dot{x}$ .

Generally functions  $F$  and  $M$  look like  $M = M(t, x, \dot{x}); \quad F = F(t, x, \dot{x})$ .

As follows from works [2,3], Lagrangian  $L$  in a boundary layer  $\Delta$  looks like

$$\begin{aligned} L_{\Delta}(t, x, \dot{x}) = & S_u \cdot x + S_{tu} \cdot tx + \frac{1}{2} S_{2u} \cdot x^2 + \frac{1}{2} \sigma \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} S_{2u} \cdot t^2 x + \frac{1}{2} S_{t2u} \cdot t \dot{x}^2 + \\ & + \frac{1}{6} S_{3u} \cdot x^3 + \frac{1}{6} K_1 \cdot \dot{x}^3 + \frac{1}{2} S_{t2v} \cdot t \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \sigma_u \cdot x \dot{x}^2 + \frac{1}{6} S_{3tu} \cdot t^3 x + \\ & + \frac{1}{4} S_{2t2u} \cdot t^2 x^2 + \frac{1}{6} S_{t3u} \cdot t \dot{x}^3 + \frac{1}{24} D \cdot x^4 + \frac{1}{24} K_2 \cdot \dot{x}^4 + \frac{1}{6} S_{t3v} \cdot t \dot{x}^3 + \\ & + \frac{1}{6} K_{tu} \cdot x \dot{x}^3 + \frac{1}{4} S_{2t2v} \cdot t^2 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} S_{tu2v} \cdot t x \dot{x}^2 + \frac{1}{4} \sigma_{u^2} \cdot x^2 \dot{x}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

In last formula constants before argument  $t$ , variables  $x = x(t)$ ,  $\dot{x} = \dot{x}(t)$  are defined from statement of a problem and can be found according to formulas (4, 5).

By the author it is investigated two cases of absolute speed of joining particles:  $\bar{q} = const$  and  $\bar{q} = 0$ .

The possible applications of the equation of Euler – Lagrange in a boundary layer researched by the author are specified in works [1,2]. One of special cases (2-4) this equation can be applied in the following area: the management of a movement of the rubbish collector in the space around the earth.

### References

1. Novoselov V.S. Analytical's Mechanics for the Systems of variable mass. Leningrad, Leningrad's State University, 240 p. (in Russian).
2. Svyatskov V.A. 2000. The equation of Euler – Lagrange in boundary layer with applications. Cheboksary, Chuvash State Pedagogical University, 165 p. (in Russian).
3. Svyatskov V.A. One Metod of Calculation for Optimal Shape of a Body in Hypersonic Flow near a Singular Point.// High Speed Hydrodynamics. The Intetnational Summer Scientific School.– Russia, Cheboksary: 2002.– pp.383-388.

## ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ЭЙЛЕРА – ЛАГРАНЖА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ К ИССЛЕДОВАНИЮ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА ПЕРЕМЕННОЙ МАССЫ

**Виктор А. Святсков**

Чебоксарский институт МГОУ

54, ул. Маркса, 428000 Чебоксары, Россия

Введем обозначения:  $M$  – масса тела в момент времени  $t$ ,  $\vec{v}$  - абсолютная скорость тела в момент времени  $t$ ,  $\vec{q}$  – абсолютная скорость при- соединяющейся (отделяющейся) частицы в момент времени  $t$ ,  $\vec{F}$  - главный вектор приложенных к телу сил в момент времени  $t$ . Уравнение движения тела переменной массы в этих обозначениях имеет вид [1]:

$$M \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} + (\vec{q} - \vec{v}) \cdot \frac{dM}{dt}, \quad (1)$$

Пусть в уравнении (1)  $\vec{q} = const$ . Тогда

$$\frac{d}{dt} [M(\vec{v} - \vec{q})] = \vec{F}. \quad (2)$$

Не нарушая общности дальнейших рассуждений, предположим, что тело переменной массы движется прямолинейно. В этом случае

применимо уравнение (1). Введем лагранжиан  $L = L(t, x, \dot{x})$ , на основе которого опишем движение тела. Уравнение Эйлера-Лагранжа представим в следующей форме

$$\frac{d}{dt}L_{\dot{x}} = L_x. \quad (3)$$

Из структуры записи уравнения (2) следует, что это уравнение имеет вид уравнения (3). Примем согласно работе [2]

$$L_{\dot{x}} = M(v - q); \quad L_x = F, \quad (4)$$

где  $v = \dot{x}$ . В общем случае функции  $F$  и  $M$  принимают выражения  $M = M(t, x, \dot{x})$ ;  $F = F(t, x, \dot{x})$ .

Как следует из работ [2,3], лагранжиан  $L$  в пограничном слое  $\Delta$  имеет вид:

$$\begin{aligned} L_{\Delta}(t, x, \dot{x}) = & S_u \cdot x + S_{uv} \cdot tx + \frac{1}{2} S_{2u} \cdot x^2 + \frac{1}{2} \sigma \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} S_{2uv} \cdot t^2 x + \frac{1}{2} S_{t2u} \cdot tx^2 + \\ & + \frac{1}{6} S_{3u} \cdot x^3 + \frac{1}{6} K_1 \cdot \dot{x}^3 + \frac{1}{2} S_{t2v} \cdot t \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \sigma_u \cdot x \dot{x}^2 + \frac{1}{6} S_{3uv} \cdot t^3 x + \\ & + \frac{1}{4} S_{2t2u} \cdot t^2 x^2 + \frac{1}{6} S_{t3u} \cdot tx^3 + \frac{1}{24} D \cdot x^4 + \frac{1}{24} K_2 \cdot \dot{x}^4 + \frac{1}{6} S_{t3v} \cdot t \dot{x}^3 + \\ & + \frac{1}{6} K_{1u} \cdot x \dot{x}^3 + \frac{1}{4} S_{2t2v} \cdot t^2 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} S_{uv2v} \cdot tx \dot{x}^2 + \frac{1}{4} \sigma_{u^2} \cdot x^2 \dot{x}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

В последней формуле константы перед аргументом  $t$ , переменными  $x = x(t)$ ,  $\dot{x} = \dot{x}(t)$  определяются из постановки задачи и могут быть найдены согласно формулам (4, 5).

Автором исследовано два случая абсолютной скорости соединяющихся частиц:  $\bar{q} = const$  и  $\bar{q} = 0$

Возможные приложения исследуемого автором уравнения Эйлера – Лагранжа в пограничном слое указаны в работах [1,2]. Один из частных случаев (2-4) этого уравнения может быть применен в следующей области: управление движением мусоросборщиков в околоземном пространстве.

### Литература

1. Новоселов В.С. Аналитическая механика систем с переменными массами. – Л.: ЛГУ, 1969. – 240 с.

2. Святсков В.А. Уравнение Эйлера – Лагранжа в пограничном слое и его приложения. – Чебоксары: ЧГПУ, 2000. – 165с.

3.Svyatskov V.A. One Metod of Calculation for Optimal Shape of a Body in Hypersonic Flow near a Singular Point.// High Speed Hydrodynamics. The Intetnational Summer Scientific School. – Russia, Cheboksary: 2002. – pp.383 – 388.

## **DESIGN OF SUPERCAVITATING HYDROFOILS**

**Alexey .G. Terentiev**

Cheboksary Institute of the Moscow State Open University  
54, Marks str, 428000, Cheboksary, Russia

Supercavitating hydrofoils can be design as structures between some curve of forcing side and a boundary of a cavity. By a variation of forcing side, it is possible to design a hydrofoils with high enough characteristics. Supercavitating hydrofoils were offered in 40th years of the last century by V.L.Pozdjunin, and a bit later on the basis of the linear theory the supercavitating hydrofoils were calculated by M.P.Tulin (1954), and also multiple parameter hydrofoils were considered by Johnson and Virgil (1961). Alongside with extreme conditions concerning hydrodynamic characteristics Supercavitating hydrofoils should satisfy to additional conditions of constructive character. In particular, thickness of a structure should not be too thin to not weaken elastic characteristics; the upper side of a hydrofoil should be designed so that keeps high hydrodynamic characteristics on non cavitating modes. During designing can arise and other conditions.

It is not obviously possible all requirements to execute within the framework of the linear theory, as the solution at a leading edge has a singularity and the cavity boundary cannot be calculated exactly. The problem can be solved within the framework of the inverse theory of value problems, however, in this case not clearly from what reasons it is necessary to set distribution of pressure on the bottom side of hydrofoils.

Below the problem of design of supercavitating hydrofoils is reduced to a problem of conditional extremum. For this purpose, the base nonlinear problem of a flow of a plate under Kirchoff's model in the beginning is used, and then the problem about a small curvature of a plate is solved. The solution of a problem is as trigonometrically series represented which factors are determined from conditional extremum for quality or for the lift. A number supercavitating hydrofoil is designed. Some of them will be coordinated to the hydrofoils used on high-speed ships and supercavitating propellers.

## ПОСТРОЕНИЕ СУПЕРКАВИТИРУЮЩИХ ПРОФИЛЕЙ

Алексей Г. Терентьев

Чебоксарский институт

Московского Государственного Открытого Университета

54, ул. Маркса, 428000 Чебоксары, Россия

Суперкавитирующие профили могут быть построены как профили между некоторой кривой нагнетающей стороны и границей каверны. Путем вариации нагнетающей стороны можно получить профили с достаточно высокими характеристиками. Суперкавитирующие профили были предложены еще в 40-х годах прошлого века В.Л. Позднюниным, несколько позже на основе линейной теории суперкавитирующий профиль был предложен М.П. Тулиным (1954), а также многопараметрические профили были рассмотрены Джонсоном и др. (1961). Наряду с экстремальными условиями относительно гидродинамических характеристик профили должны удовлетворять дополнительным условиям конструктивного характера. В частности, толщина профиля не должна быть слишком тонкой, чтобы не ослабить прочностные характеристики, кормовая часть профиля должна быть спрофилирована таким образом, чтобы сохранить высокие гидродинамические характеристики на некавитирующих режимах. В процессе конструирования могут возникнуть и другие условия.

Все требования выполнить в рамках линейной теории не представляется возможным, поскольку в передней кромке решение имеет особенность и граница каверны искажается. Можно рассчитать профиль в рамках теории обратных краевых задач, однако, в этом случае не ясно из каких соображений следует задавать распределение давления на нижней стороне профиля.

Ниже задача о построении профиля сводится к задаче об условном экстремуме. Для этого, вначале используется базовая нелинейная задача об обтекании пластины по схеме Кирхгофа, затем решается задача о малом искривлении пластины. Решение задачи находится в виде тригонометрического ряда, коэффициенты которого определяются из условного экстремума для качества профиля или для подъемной силы. Рассчитан ряд суперкавитирующих профилей с высоким качеством. Некоторые из них согласуются с профилями, применяемыми на скоростных судах и гребных винтах.

## **CAVITATING FLOW OF A PLATE IN A GRAVITY FIELD**

**Alexey G. Terentiev, A.S. Demidov**

Cheboksary Institute of the Moscow State Open University  
54, Marks str, 428000, Cheboksary, Russia

It is investigated cavitating flows of a plate and a wedge in a gravity field directed any way. The problem is considered in classical statement of the nonlinear theory of cavitating flows: the Neumann's condition on solid boundary and a dynamic condition of constancy of pressure on a cavity boundary are satisfied; the logarithmic function of complex velocity at the end of a cavity has an integrality singularity. In case of gravity the dynamic condition is expressed by the nonlinear equation concerning speed. The problem is solved in a parametrical form by conformal mapping of a flow domain onto an interior of a semicircle. The derivative of complex potential in a parametrical plane is found analytically due to singularity and nulls, and logarithmic function of complex speed in view of all singularities is found as power series which factors are calculated in iteration manner. Convergence of factors of lines depends on as far as singularities of flow are taken full into account and conditions in separate points are satisfied. The similar approach of power series is widely applied in hydrodynamics.

Alongside with classical statement of a problem of cavitating flow, the Riabouchinsky's model with short circuit of a cavity on a perpendicular and inclined plate is considered. As parametrical domain the ring is used. Iterative algorithms are developed. Numerical results are similar to results from the linear theory (Tulin, Akosta, Efremov, Galanin and Gusev) or from nonlinear statement by using different models (Lenau, Terentiev, Kotlyar and Troepolskaya), however there are also essential distinctions in a case of a transverse gravity field.

## **КАВИТАЦИОННОЕ ОБТЕКАНИЕ ПЛАСТИНЫ В ПОЛЕ СИЛ ТЯЖЕСТИ**

**Алексей Г. Терентьев, А.С. Демидов**

Чебоксарский институт МГОУ  
54, ул. Маркса, 428000 Чебоксары, Россия

Исследуется кавитационное обтекание пластины и клина в весо-  
мой жидкости в произвольно ориентированном поле сил тяжести. За-  
дача рассматривается в классической постановке нелинейной теории



кавитационных течений: на твердой границе удовлетворяется условие Неймана, на границах каверны - динамическое условие постоянство давлений, в конце каверны интегрируемая особенность. В случае несжимаемой жидкости последнее условие выражается нелинейным уравнением относительно скорости. Задача решается в параметрическом виде путем конформного отображения области течения на внутренность полукруга. Производная комплексного потенциала в параметрической плоскости отыскивается аналитически, а логарифмическая функция комплексной скорости с учетом всех особенностей отыскивается в виде степенного ряда, коэффициенты которого вычисляются методом итерации. Сходимость коэффициентов ряда зависит от того, насколько полно учтены особенности течения и удовлетворены условия в отдельных точках. Подобный подход широко применяется в гидродинамике.

Наряду с классической постановкой задачи о кавитационном обтекании рассматривается обтекание наклонной пластины по схеме Рябушинского с замыканием каверны на перпендикулярную и наклонную фиктивную пластину. В качестве параметрической области используется кольцо. Разработаны итерационные алгоритмы. Обсуждаются числовые результаты, которые аналогичны результатам из линейной теории (Тулин, Акоста, Ефремов, Галанин и Гусев) или рассчитанным по разным кавитационным схемам в нелинейной постановке (Лено, Терентьев, Котляр и Троепольская), однако есть и существенные различия в случае поперечного поля сил тяжести.

## **THE UNSTEADY LIQUID CURRENTS WITH FREE BORDERS AND ENVIRONMENT'S BOUNDARY**

**Natal'ya V. Vagizova, Arkadii V. Kuznetsov**

Chebotarev Research Institute of Mathematics and Mechanics,

Kazan State University,

17, Universitetskaya St., Kazan 420008, Tatarstan, Russia

The task of a jet flow of a varying obstacle and exhalations from under a board with a nonlinear dynamic condition on free borders, and the task of non-stationary interaction of two flows of liquids with different complete pressure are investigated by methods of the theory of unsteady currents.

It is shown, that the specified nonlinearity is the reason of formation of liquid speed breaks and infinite sheeted spiral volutes on free borders similar to double spiral "whirlwinds" in M. Tulin cavitation circuit. The moment of occurrence, break evolution and other currents characteristics are defined.

**НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ  
СО СВОБОДНЫМИ ГРАНИЦАМИ  
И ГРАНИЦАМИ РАЗДЕЛА СРЕД**

**Наталья В. Вагизова, Аркадий В. Кузнецов**

НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева

Казанского государственного университета

17 ул. Университетская, 420008 Казань, Татарстан, Россия

Методами теории слабо возмущенных течений исследуется задача струйного обтекания колеблющегося препятствия и истечения из-под щита с нелинейным динамическим условием на свободных границах, а также задача о нестационарном взаимодействии двух потоков жидкостей с разными полными давлениями.

Показано, что указанная нелинейность является причиной образования разрывов скорости жидкости и бесконечнолистных спиральных завитков на свободных границах, аналогичных двойным спиральным "вихрям" в кавитационной схеме М. Тулина. Определяется момент возникновения, эволюция разрыва и остальные характеристики течений.

**INFLUENCE OF SHIFTING FASTEN SECTION BEING  
IN NON-UNIFORM FLOW ON PRESSURE DISTRIBUTION  
ALONG ITS SURFACE**

**Leonid I. Vishnevsky\*, Elena L. Vishnevskay\*\***

\*Krylov Ship Institute,

44, Moskovskoe shosse, 196158 S. Petersburg, Russia

\*\*CBSI, 2, Victory square, 196158 S. Petersburg, Russia

In this report it is considered the movement of section in non-uniform flow of ideal liquid. The section is movably fasten so that it is admitted the small elasticity two dimensional displacements. Flow perturba-

tions is suggested as potential. Non-passage condition is met and at the trailing edge there is postulate of Chaplygin-Jukovsky. The main attention is put to after resonance oscillation of section which is in the condition of circular flow around.

It is analytically shown that arising variable hydrodynamic loads and acting on the section to be moved in prescribed non-uniform flow are always more in fixed conditions. Physically this phenomena it is explained by the way that in the case of “soft” fastening the kinetic energy of non-uniform flow is expended for creating of variable force on section and for working which is connected to overcome of inertia with oscillation in after resonance mode as well at the same time in the case of fixed section this energy is expended only for creating of oscillating hydrodynamics loads. With increasing of density material the influence of move ability on arising variable loads turn to weaker. This effect is connected with the fact that with increasing of the section mass the displacements become inconsiderable and the work in this case tends to zero.

In this report it is obtained asymptotic expressions for defining of pressure coefficient (PC). It is shown that amplitude of PC' oscillation on section to be oscillated in after resonance mode due to non-stationary flow is always less in the case of “soft” fastening then in the case of non-oscillating section. When the frequency of the hydrodynamics perturbations is increasing this amplitude increases with square law and in as limit it becomes equal to amplitude of fixed section.

## **ВЛИЯНИЕ ПОДВИЖНОГО КРЕПЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ, ДВИЖУЩЕГОСЯ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО ПОТОКА, НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПО ЕГО ПОВЕРХНОСТИ**

**Леонид И. Вишневский\*, Елена Л. Вишневская\*\***

\*ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова,

44, Московское шоссе, 196158, С. Петербург, Россия

\*\*СБСИ, 2, площадь Победы, 196158 С. Петербург, Россия

В работе рассмотрено поступательное движение профиля в неравномерном потоке идеальной жидкости. Профиль подвижно закреплен так, что допускаются малые упругие плоско параллельные перемещения. Вызванное течение жидкости предполагается потенциаль-

ным. На профиле соблюдается условие непротекания, а на его выходящей кромке постулат Чаплыгина-Жуковского. Основное внимание в работе уделено за резонансным колебаниям профиля, находящемуся в условиях циркуляционного обтекания.

Аналитически показано, что возникающие переменные гидродинамические нагрузки на движущемся в заданной неравномерности профиле всегда больше в условиях его жесткого крепления. Физически этот факт объясняется тем, что при «мягком» креплении кинетическая энергия неравномерного потока затрачивается как на создание переменных сил на профиле, так и на работу, связанную с преодолением его инерции при колебаниях в зарезонансном режиме, в то время как при жестком креплении упомянутая выше энергия затрачивается только на создание возбуждающих нагрузок. С увеличением плотности материала профиля влияние подвижности на возникающие на нем переменные нагрузки ослабевает. Это связано с тем, что с увеличением массы профиля его перемещения становятся незначительными, работа на которых стремится к нулю.

В работе получены асимптотические выражения для определения коэффициента давления (КД). Показано, что амплитуда колебаний КД на профиле, колеблющемся в зарезонансной области частот вследствие нестационарности потока, всегда меньше в случае «мягкого» его крепления, чем у неколеблющегося профиля. С увеличением частоты гидродинамического возмущения эта амплитуда увеличивается по квадратичному закону и в пределе становится равной амплитуде, соответствующей жесткому креплению профиля на подвесе.

## **THE DEVELOPMENT OF THE TWO-ELEMENT AIRFOIL DESIGN METHOD IN A CASE OF COMPRESSIBILITY AND VISCOSITY INFLUENCE**

**Pavel A. Volkov**

Chebotarev Institute of Mathematics and Mechanics,  
Kazan State University  
17 Universitetskaya Str., 420008 Kazan, Russia

Being based on [1], the two-element airfoil design method was developed in the case of simultaneous account of compressibility and viscosity influence. Mathematical models of boundary layer and Chaplygin gas

were used. The input data were: profiles perimeters; dimensionless velocity distributions  $\lambda_i(s) = V_i(s)/a_*$ , ( $i = 1, 2$ ) on displacement body contours, where  $a_*$  is the critical sonic velocity value and  $s$  is the contour arc length; values of Mach number  $M_\infty$  and Reynolds number  $Re_\infty$ ; the value of potential difference  $\varphi^*$ ; the distance  $q$  between the profiles in  $w$  plane. Velocity distributions  $\lambda_i(s)$  were selected by form to guarantee a non-separating flow within the framework of used mathematical models. Actually initial problem was reduced to another problem, the essence of which consists in finding displacement body contours, flowed by inviscid Chaplygin gas. At that displacement thickness  $\delta_i^*(s)$  was found by the uniparametric Kochin-Loytsyanskiy method [2]. The point of laminar boundary layer transition was determined by Eppler criterion [3]. The fulfillment of solvability conditions was satisfied by variations of free parameters. Numerical calculations were carried out.

The author wish to thank the science advisor professor N.B. Il'inskiy for supporting this work. The present research was supported by the Russian Foundation for Basic Research ( N 02-01-00061) and by NIOKR fund of Tatarstan republic.

### References

1. *Elizarov A.M., Il'inskiy N.B., Potashev A.V.* Mathematical methods of airfoils design (inverse boundary-value problems of aerohydrodynamics). Berlin: Academie Verlag, 1997. 292 p.
2. *Loytsyanskiy L.G.* Fluid mechanics. – M.: Science, 1987. 840 p.
3. *Eppler R.* Airfoil design and data. – Berlin: Springer-Verlag, 1990. – 562p.

# ОБОБЩЕНИЕ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ ДВУХЭЛЕМЕНТНОГО КРЫЛОВОГО ПРОФИЛЯ НА СЛУЧАЙ УЧЕТА ВЯЗКОСТИ И СЖИМАЕМОСТИ

Павел А. Волков

НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева  
Казанского государственного университета  
17 ул. Университетская, 420008 Казань, Россия

Опираясь на работу [1], проведено обобщение задачи построения двухэлементного крылового профиля на случай одновременного учета вязкости и сжимаемости потока. Вязкость учитывалась по модели пограничного слоя, а сжимаемость – по модели газа Чаплыгина. В качестве исходных данных задавались распределения приведенных скоростей  $\lambda_i(s)$ , ( $i = \overline{1,2}$ ) на искомым контурах полутел вытеснения, где  $s$  – дуговая абсцисса. Значения чисел Рейнольдса  $Re_\infty$  и Маха  $M_\infty$  потока на бесконечности, расхода  $q$  между контурами и разности потенциалов  $\varphi^*$  между точками разветвления потока так же считались заданными. Исходные распределения  $\lambda_i(s)$  выбраны в виде, обеспечивающем безотрывный характер обтекания в рамках принятых математических моделей. Исходная задача сведена к нахождению разомкнутых контуров полутел вытеснения, обтекаемых невязким газом Чаплыгина. Функция толщин вытеснения  $\delta_i^*(s)$  найдена из расчета ПС однопараметрическим методом Кочина-Лойцянского [2]. Для определения точек перехода ламинарного ПС в турбулентный использован критерий, предложенный Р. Эпплером [3]. Отступая внутрь границ полутел по нормали на толщины вытеснения  $\delta_i^*(s)$ , получим форму искомым профилей. Для выполнения условий разрешимости задачи использован метод свободных параметров. Приведены примеры расчетов.

Автор благодарит научного руководителя проф. Н.Б. Ильинского за предложенную тему. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 02-01-00061) и Фонда НИОКР Республики Татарстан.

## Литература

1. Елизаров А.М., Ильинский Н.Б., Поташев А.В. Обратные краевые задачи аэрогидродинамики. М.: Наука, 1994. 440с.

2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. 840с.
3. Eppler R. Airfoil design and data. – Berlin: Springer–Verlag, 1990. – 562p.

## **DETERMINATION OF METODICAL AND INSTRUMENTAL ERRORS OF STATISTIC AND SPECTRAL MEASUREMENTS**

**N. A. Zaiko, Vladimir P. Zhitnikov**

State Aviation Technical University of Ufa

12, K.Marx str., 450000 Ufa, Russia

At the end of the past century scientists came to the conclusion that experimental error cannot be as small as we wish, because it belongs to the experiment reality and must be a part of its theory. Measurement of physical quantity with the highest accuracy is a very difficult problem. The role of errors in statistic and spectral measurements is especially great, because neglect of errors or their incorrect calculation leads to erroneous results or the necessity to repeat measurements. In any case it is accompanied by great economic wastes.

As a rule, each factor influencing the error of statistic and spectral measurements is assessed by its elementary error. As it takes place, errors because of level quantization and time sampling of indications, limitedness of sample size and realization length are taken into consideration separately. For assessment of measurement accuracy of statistic and spectral characteristics elementary errors are summed up.

Analysis showed that chosen from elementary errors quantizing interval, spacing of time sampling, sample size and realization length cannot be considered the best and characteristics of resulting error cannot be reliable. The explanation is that each elementary error is calculated of its own method, on the basis of its own mathematical model and does not take into consideration the influence of other factors. Taking into consideration integrated effect of different factors in summing up elementary errors practically fails.

Methods of simulative modeling and experimental determination of error characteristics are devoid of the disadvantage mentioned above. However, they require much time and availability of expensive reference means

of measurement. Besides, experimental methods are known to have limited functional potentials and are expensive.

The combined use of calculated and experimental methods and methods of simulative modeling appear to have considerable promise. However, combination of such different by their nature methods is possible only on the basis of suitable theory of measurement accuracy that is being worked out nowadays.

The paper is devoted to the original complex approach to the error determination of statistic and spectral measurements. This approach extends the possibilities of methods mentioned above at the expense of complex calculation of the main factors that influence the accuracy of statistic and spectral measurements: readings error, algorithms of signal restoration between readings, spacing of time sampling, sample size and realization length. The idea of complex approach consists of error measurement consideration as a whole, transforming with the change of measurements mode, operating conditions and other factors. It conforms well with experimental method and method of simulative modeling.

In the realization of complex approach the definition of ergodic random processes is redetermined and measurement algorithms of probability distribution densities and their errors are obtained. From them it is possible to get measurement algorithms of characteristic functions, moment and spectral characteristics of random processes and expressions for calculating their errors.

Realization of the mentioned algorithms by means of digital devices leads to the appearance of additional algorithms errors. Data inaccuracy is defined by methodical readings error and speed of devices response in execution of different kinds of operations. Rounding-off and truncation errors arise because of the limited word length of numbers representation in computer. Therefore, it is necessary to carry out the analysis of calculation results with the output of the following recommendations on selection of the necessary digital devices word length for providing the necessary measurements accuracy.

Theoretical analysis and experimental check of these results showed that complex approach to the error definition of statistic and spectral measurements allows not only to receive scientific basis of accuracy appraisal and reliable measurement results. Besides, it gives an opportunity to synthesize quick and exact measurement algorithms of statistic and spectral characteristics of random signal and to optimize measurement experiment. So, synthesized algorithms allow with the same realization length to de-



crease error measurement by 2-4 times in comparison with the well-known algorithms. And vice versa, with the invariable accuracy of measurements it is possible to decrease the realization length by 2-4 times too. Finally, the theory of accuracy which is being worked out now allows to get effective methods of decreasing errors, of analysis and synthesis of modern information measuring systems.

Thus, the discussed theory of accuracy belongs to the fundamental metrology problems. It is based on the original complex approach to the errors definition that allows in correlation to take into consideration the main factors influencing the measurements accuracy. Complex approach possesses high reliability in comparison with the existing approach. It has no summation of elementary errors which cannot be fulfilled correctly with due regard to their correlation.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ СТАТИСТИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

**Н.А. Заико, Владимир П. Житников**

Уфимский государственный авиационный технический университет  
12, ул. К. Маркса, 450000 Уфа, Россия

В конце уходящего столетия пришло осознание того, что экспериментальную погрешность нельзя сделать по желанию сколь угодно малой, ибо она относится к действительности эксперимента и должна входить в его теорию составной частью. Чем точнее исследователи хотят измерить физическую величину, тем труднее им это сделать. Особенно велика роль погрешностей при статических и спектральных измерениях, когда пренебрежение погрешностями или их некорректный учет приводят к серьезным ошибкам или необходимости повторить измерения. В любом случае, это сопровождается большими экономическими затратами.

Как правило, каждый влияющий на погрешность статистических и спектральных измерений фактор оценивается своей элементарной погрешностью. Так, отдельно учитываются погрешности из-за квантованности по уровню и дискретности во времени показаний, ограниченности объема выборки и длины реализации. Для оценки

точности измерения статистических и спектральных характеристик элементарные погрешности суммируются.

Анализ этого решения проблемы показал, что выбранные из элементарных погрешностей апертуры квантования по уровню, шаг дискретизации во времени, объем выборки и длину реализации нельзя считать наилучшими, а характеристики результирующей погрешности достоверными. Это объясняется тем, что каждая элементарная погрешность находится своим методом, на основе своей математической модели и не учитывает влияние остальных факторов. Учесть интегральное влияние различных факторов при суммировании элементарных погрешностей практически не удастся.

Данного недостатка лишены методы имитационного моделирования и экспериментального определения характеристик погрешностей. Однако они требуют значительного времени и наличия дорогостоящих образцовых средств измерений. Кроме того, экспериментальный метод имеет ограниченные функциональные возможности и дорог.

Весьма перспективным считается совместное использование расчетных и экспериментальных методов, а также методов имитационного моделирования. Однако, объединение столь различных по своей природе методов возможно только на основе адекватной теории точности измерений, которая в настоящее время разрабатывается.

Доклад посвящен оригинальному комплексному подходу к определению погрешностей статистических и спектральных измерений. Этот подход расширяет возможности указанных выше методов за счет комплексного учета основных факторов, влияющих на точность статистических и спектральных измерений: погрешности отсчетов, алгоритмов восстановления сигналов между отсчетами, шага дискретизации, объема выборки и длины реализации. Идея комплексного подхода заключается в том, чтобы рассматривать погрешность измерений как единое и неделимое целое, трансформирующееся с изменением режимов измерений, условий эксплуатации и других факторов. Он хорошо согласуется с экспериментальным методом и имитационным моделированием.

Реализация рассмотренных алгоритмов с помощью цифровых устройств приводит к появлению дополнительных погрешностей алгоритмов. Неточность данных определяется методической погрешностью отсчетов и быстродействием устройств при

выполнении различного рода операций. Погрешности округления и усечения порождаются ограниченной разрядностью представления чисел в ЭВМ. Следовательно, необходимо проводить анализ результатов вычислений с последующей выдачей рекомендаций по подбору необходимого числа разрядов вычислительных устройств для обеспечения необходимой точности измерений.

Теоретический анализ и экспериментальная проверка этих результатов показали, что комплексный подход к определению погрешностей статистических и спектральных измерений позволяет, прежде всего, получить научно обоснованные оценки точности и достоверности результатов измерений. Кроме того, он позволяет синтезировать быстрые и точные алгоритмы измерения статистических и спектральных характеристик случайных сигналов. Так, синтезированные алгоритмы позволяют при той же длительности реализации уменьшить погрешность измерения в 2-4 раза по сравнению с известными алгоритмами. И, наоборот, при неизменной точности измерений во столько же раз можно уменьшить длительность реализации. Наконец, разрабатываемая теория точности позволяет получить эффективные методы уменьшения погрешностей, анализа и синтеза современных информационно-измерительных систем.

Таким образом, разрабатываемая теория точности относится к фундаментальным проблемам метрологии. Она основывается на оригинальном комплексном подходе к определению погрешностей, позволяющем во взаимосвязи учесть основные факторы, влияющие на точность измерений. Комплексный подход к определению погрешности обладает большей достоверностью по сравнению с существующим подходом. В нем отсутствует суммирование элементарных погрешностей, которое нельзя выполнить корректно с учетом их коррелированности.

# PREDICTING CAVITATION IN CENTRIFUGAL PUMPS

**Zgolli Ridha**

Laboratoire LHME, Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tunis  
ENIT - BP. 37 Le Belvédère -1002, Tunis, Tunisia

The numerical methods predicting the cavitation phenomenon in hydraulic turbomachineries based on internal flow control, progress in two ways depending on the mathematical formulation adopted for analysing the internal flow with fluid considered mono-phase or multi-phase. The latter are generally based on a formulation of mixture of fluid considered to be homogeneous, using a modeling of the formation and collapse of a cavity, realising an interfacial model of mass-transfer and a global approach of the associated turbulent viscosity. In addition a much research works into monophasic to predict cavitation, done independently from flow computation based on a 3-D-RANS calculation, are carried out with the help of a preliminary modeling of the formation and the evolution of the cavity. And this modeling is generally based on an iterative procedure, whose results remain closely related to the conditions of initialization. It is precisely within this framework that we present a simplistic numerical approach here, making it possible to model the localization of the possible appearance of the first cavity, holding account of the geometry of the machine and its operating point. The approach is based on a blade to blade flow into quasi-stationary computation with certain simplifying assumptions likely not to deteriorate the required results. The industrial code Phoenics (Parabolic Hyperbolic Gold Elliptic Numerical Integration Series Codes) was used, with a MBFGE (MultiBlock Finite Grid Element) special discretization. To dissociate the effects related to the volute, an iterative procedure is adopted for the coupling of the flow through the impeller with a constant rotational speed considered separate and converging towards the flow through all the machine. The results are presented by application to a centrifugal pump at low specific speed. We note that the presence of the volute does not assign the hazardous region of the appearance of cavitation in the bladechannels of the impeller. And a model of initialization for the prediction of cavitation was established following the control of the flow through the wheel considered separate. It is presented in the form of relation between the reduced values of the flow and the curvilinear X-coordinate of the minimum pressure point calculated over the suction side of the blade airfoil. This work will be use as a basurs for elaboration of full cavity prediction computation.

## QUASI-ANALYTICAL METHOD OF CALCULATION OF NON-STATIONARY ELECTROCHEMICAL SHAPING

V.P. Zhitnikov, G.I. Fedorova, O.R. Zinnatullina

The State Aviation Technical University of Ufa,  
12, K.Marx str., 450000 Ufa, Russia

The nonstationary electrochemical shaping problem and boundary conditions are formulated as a result of Faraday's law. The problem is reduced to solving of two boundary problems for analytical function of complex variable determination on each time step: the Dirichlet problem for electric field intensity determination and Riemann-Gilbert problem for partial derivatives calculation of interelectrode space points coordinates on time (with images of points on auxiliary complex variable plane fixed).

In this field, methods of hydrodynamics boundary problems solution, particularly complex variable theory methods are widely used.

Interelectrode space and complex potential are conformally mapped onto elementary field. For solved problems, semicircle mapping is mostly careful. It allows to isolate singularities of solution, to accelerate convergence and to increase stability field. Moreover the problems solution is determined as a sum of some functions, which are mapped onto semicircle.

Real part of the function is determined with Schwartz integral and discrete values of imaginary part of  $f(\zeta)$ , mapping semicircle  $\zeta$  onto interelectrode space

Partial derivatives of real and imaginary part of  $f(\zeta)$  are coefficients of boundary conditions of Riemann-Gilbert problem. The time partial derivative is determined as quadratures.

Next, time step is made when semicircle nodes or real part or imaginary part of  $f(\zeta)$  are fixed. These methods allow to escape self-crossing effect, which cause instability. To make this, high precision methods of Cauchy problems for differential equations solving are used.

As a result of time step execution, new values of imaginary part of  $f(\zeta)$  in new nodes are obtained, then the process is repeated.

For precision control and verification, Runge rule is used. Besides, complementary method of error estimation is used. Curvilinear electrode tool shape remains uniform in a time, but conformal mapping is changed. The error of electrode tool shape can be taken as error estimate of work-piece configuration. As the considered processes are reduced to stationary processes, electrode tool machining problems, which have analytic station-

ary solutions, are used as test examples. As the method doesn't require equation system solving (or using the solution of systems with banded matrix for four-order precision spline interpolation), the calculation time is proportional to  $n^2$ .

## **ПОЧТИ АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

**В.П. Житников, Г.И. Федорова, О.Р. Зиннатуллина**

Уфимский государственный авиационный технический университет  
12, К. Маркса, 450000 Уфа, Россия

На основе закона Фарадея сформулированы краевые условия задачи электрохимического формообразования. На каждом временном шаге задача сводится к решению двух краевых задач для определения аналитических функций комплексного переменного: задачи Дирихле для нахождения напряженности электрического поля и задачи Римана-Гильберта для определения частных производных координат точек межэлектродного пространства (МЭП) по времени (при сохранении образов точек на плоскости вспомогательного комплексного переменного).

В данной области широко используются методы решения краевых задач гидродинамики, в частности, методов теории функций комплексного переменного.

Области межэлектродного пространства (МЭП) и комплексного потенциала конформно отображаются на области простой конфигурации. Для рассмотренных в сообщении задач более удобным является отображение на полукруг. Это позволяет учесть особенности решения, чем существенно ускоряется сходимость и увеличивается область устойчивости. С этой целью решение ищется в виде суммы нескольких функций, каждая из которых может отображаться на свой полукруг.

Первая часть задачи (определение напряженности электрического поля) решается следующим образом. По дискретным значениям мнимой части функции  $f(\zeta)$ , отображающей полукруг  $\zeta$  на МЭП, с помощью интеграла Шварца определяется действительная часть функции.

Частные производные действительной и мнимой части  $f(\zeta)$  являются коэффициентами в краевом условии задачи Римана-Гильберта для определения частной производной  $f(\zeta)$  по времени, решение которой получается в виде квадратур.

Далее производится шаг по времени при фиксированных узловых точках на полуокружности, либо фиксируются мнимые или действительные части  $f(\zeta)$ . Эти способы сдвига позволяют избежать эффекта самопересечения, приводящего к неустойчивости. Для выполнения шага используются методы высокого порядка точности решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений.

В результате выполнения временного шага получаются новые значения мнимой части  $f(\zeta)$  в новых узловых точках и процесс повторяется.

Для контроля точности и достоверности решения использовались правило Рунге. Кроме того, для данного метода решения существует дополнительный способ оценки погрешности. Криволинейная форма электрода-инструмента (ЭИ) должна сохраняться во времени, однако, меняется конформное отображение. По отличию формы ЭИ можно также оценить погрешность расчета формы обрабатываемой поверхности. Поскольку рассмотренные процессы сходятся к стационарным, в качестве тестовых примеров рассматривалась обработка ЭИ, для которых известны аналитические стационарные решения.

Поскольку предлагаемый метод не требует решения систем уравнений (или требует, но только систем с ленточной матрицей при интерполяции сплайном 4-го порядка точности), то время, затраченное на выполнение расчетов на каждом шаге пропорционально  $n^2$ .

## TITLE LIST

- Kishkina NYu** Memories of the general designer of space-rocket engineering Vladimir Nikolaevich Chelomey (to the 90-anniversary from birthday)
- Abrukov VS, Troeshestova DA** Application of neural networks methods for some hydrodynamic problems
- Abzalilov DF** Minimization of an airofoil drag coefficient using optimum control methods
- Afanasiev KE, Berezin EN** Numerical simulation of interaction of surface waves with a solid partially submerged into a fluid
- Afanasiev KE, Grigorieva IV** Numerical modeling of dynamics a three-dimensional vapour-gas bubbles
- Aganin AA, Guseva TS** Stability of the spherical shape of a bubble under its single strong enlargement-compression
- Aganin AA, Toporkov DYu** Liquid viscosity effect in dynamics of a non-spherical bubble
- Aniskina NG, Boriskina IP, Martynov S I** Dynamics of particles in non stationary flow of non-viscous fluid
- Atanov GA, Semko AN** Numerical analysis of the jet flows of compressible water
- Atanov GA, Semko AN, Geskin ES** Peculiarities of the motion of the powder hydro-cannon jet in the air
- Baranov VE, Martynov SI** Sedimentation of particles on the plane
- Bel'kheeva RK** Determination of tip jet characteristics in the problem of liquid wedge running into a plane
- Delale CF** A cavitating bubbly flow model with bubble/bubble interactions, thermal damping and bubble fission
- Demidov AC, Terentiev AG** Applying of potential of single layer to calculation of axisymmetric flows
- Dimitrieva NA** Cavitating flow on the axisymmetric bodies with negative cavitation numbers
- Dovgiy SA, Makasyeyev MV** Planing of a plates system with given loads
- Efremov II** Some new results of the linear theory of planning on a heavy fluid surface
- Efremov II, Lukashchik EP** Method of the solution of linear non-stationary hydroaerodynamics problems by reduction to stationary problems
- Elizarov AM, Il'inskiy NB** Variational inverse boundary-value problems and airfoil shape optimization
- Fedyayev VL, Mazo AB, Snigerev BA, Morenko IV** Modelling of the water cooling process in the cooling towers



**Fridman GM** Planing hydrofoil with spoiler under gravity: linearized the theory and asymptotic approach

**Fridman GM, Uryadov AK** Cavitating hydrofoil with stagnation zone in the spoiler vicinity: a variety of cavity closure schemes

**Frolov VA** Two-dimensional model of a potential flow about the body with blowing on its surface

**Galanin AV, Ilyin OV** Flow about the rectilinear foil having a source and run-off by free liquid surface

**Grant JR, Kirschner IN, Uhlman JS** High-speed motion in bubbly flow: comments on drag

**Gubaidullina RK, Khismatullina NA** Computation of vortex motion of liquid in non-spherical bubble dynamics

**Gutsunaev AV, Urakov AR** Using of hydrodynamics models to estimate accuracy of univariate solution for non-stationary electrochemical forming task

**Hollander W, Maklakov DV, Zaripov ShK** An efficiency of deposition of aerosol particles in the impactor with pit on the impaction surface

**Ihsanova AN** Computing experiments results in optimization problems for hydrodynamical profiles with maximum velocity limitation

**I'inskiy NB, Neberova OS** Problem of classic airfoils modification for improving aerohydrodynamic characteristics

**I'inskiy NB, Plotnikova LG** The problem of design of an airfoil of a wing with aileron in flow with separation

**Ilgamov MA, Kosolapova LA, Malakhov VG** Nonlinear non-spherical oscillations of a gas bubble in a liquid

**Ilyin VP, Levkovsky YuL** Experimental studies into the effect of air content on the hub vortex cavitation inception

**Kishkin AM** One-parametrical structures of speed in account of a boundary layer and trace of poorly streamline bodies

**Kozlov II, Prokof'ev VV** About different modes carry-over of a gas from ventilated cavity with negative cavitation number

**Kudoyarova VM** Mathematical model for integrated problem of the heat and mass transfer of the gas flow with the wall made of polymer composite material of the descending spacecraft

**Kulagin VA** Applying of termomechanic effects of cavitation to various technology

**Leontyev VG, Potashev AV** About one approach of optimization of the body hydroprofile

**Levkovsky YuL** Sound radiation induced by bodies motion with high speed and accelerations

**Lezhnev VV, Markovsky AM** One algorithm of the separating flow

**Li SC** Characteristic equations of double-row cascade flow

**Lushnikov MA** Study of the structure of the stationary separated flows around bluff bodies within the free-interaction theory framework

**Maklakov DV** On the deflectors of optimum shape

**Maltzev LI, Novikov BG** Bubbles and cavities as tools for drag reduction

**Mardanov RF** Approached method of designing airfoil near ground at angle of attack

**Martynov SI, Syromyasov AO** The motion of viscous fluid containing a periodic lattice

**Mayboroda OM** Mathematical modeling of water entry of a wedge with finite froude number

**Mazo AB** The boundary conditions for the stream function-vorticity Navier- Stokes equations

**Migranov NG** Correlation functions of hydrodynamic fluctuations in anisotropic liquids above convection threshold

**Moreno IV, Mazo AB** Numerical simulation of viscosity separated flow past a rotating circular cylinder

**Nesteruk I** Long cavities in compressible liquid and problem of drag reduction

**Nigmatulin RI** Nanoscale bubble thermonuclear fusion in acoustically cavitated deuterated liquid

**Paryshev EV** On unsteady planing of a body over liquid curvilinear surface

**Petrov AG** Asymptotic law of axisymmetric streamlines at infinity

**Rosenman AA** Creation of software and research complex for solution of mathematical simulation problems

**Rusetsky AA** Estimation of perspectives for development of fast speed waterborne transportation basing on the experience of design and exploitation of Russian fast speed vehicles

**Semenenko VN** Computer simulation of supercavitating processes

**Serebryakov VV** Supercavitation flows with gas injection-drag and drag reduction problems

**Serebryakov VV, Schnerr G** Sub-, trans-, supersonic flows in water with supercavitation

**Sheng Xu** Hydrodynamic force of supercavitating vehicle

**Sherykhalina NM, Oshmarin AA** Gravity fluid flow past a board with appearance of a free vortex

**Svyatskov VA** The application of the Euler-Lagrange equation in the boundary layer to conclusion of the main equation for a body with variable mass

**Terentiev AG** On design of supercavitating hydrofoils

**Terentiev AG, Demidov AC** Cavitating flow of the plate in a gravity field

**Vagizova NV, Kuznetsov AV** The unsteady liquid currents with free borders and environments boundary

**Vishnevsky LI, Vishnevskay EL** Influence of shifting fasten section being in non-uniform flow on pressure distribution along its surface

**Volkov PA** The development of the two-element airfoil design method in a case of compressibility and viscosity influence

**Zaiko N, Zhitnikov V P** Determination of methodical and instrumental errors of statistic and spectral measurements

**Zgolli R** Predicting cavitation in centrifugal pumps

**Zhitnikov VP, Fedorova GI, Zinnatullina OR** Quasi-analytical method of calculation of nonstationary electrochemical shaping