

УДК 629.127

М.З.Слуцкая¹

ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПОДВОДНЫЙ ОБЪЕКТ В УСЛОВИЯХ ВНУТРЕННЕГО ВОЛНЕНИЯ

Предложены математическая модель, численный метод и результаты расчетов гидродинамических сил и моментов, действующих на корпус подводного объекта (ПО), движущегося в поле внутреннего волнения. Математическое и программное обеспечение позволяет учитывать основные физические факторы: трехмерность и нестационарность течения, его пространственно-временную неоднородность, создаваемую внутренним волнением, вязкость жидкости, реальную геометрию корпуса. Приведены результаты расчетов сил для корпуса ПО при выполнении различных маневров при движении вблизи пикноклина при варьировании параметров однододовой внутренней волны. Анализ результатов подтвердил адекватность предлагаемого математического аппарата и позволил дать количественную и качественную оценку влияния внутреннего волнения на гидродинамику ПО. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании ПО и создании тренажеров, имитирующих движение в натуральных гидродинамических условиях.

В морях и океанах наблюдается значительное пространственно-временное изменение гидрофизических полей плотности, солености, температуры и скорости течения. Неоднородность плотности жидкости при определенных условиях приводит к возникновению такого физического явления как внутренние волны [1]. Эти факторы в сочетании с подводными течениями могут оказать заметное влияние на динамику движения различных подводных объектов (ПО), что подтверждается как опытом их эксплуатации, так и результатами физического и математического моделирования [2].

Основной проблемой математического прогнозирования поведения подводных объектов в условиях пространственно-временной неоднородности полей скоростей и давлений является определение гидродинамических реакций – сил и моментов, действующих на объект при движении. Очевидные сложности экспериментального нахождения этих сил приводят к необходимости поиска альтернативных подходов. Выбор между теоретическим (аналитическим) и численным моделированием оказывается в пользу последнего, поскольку аналитические решения требуют принципиальных упрощений при постановке задачи, приводящих к выхолащиванию ее содержания.

Обоснование выбора концепции математического моделирования. При строгой постановке для расчета гидродинамических реакций требуется определение нормальных (давлений) и касательных напряжений на поверхности рассматриваемого тела с дальнейшим их интегрированием по этой поверхности. Наиболее строго определение указанных напряжений может быть выполнено путем решения дифференциальных уравнений движения вязкой жидкости для турбулентного режима течения. В настоящее время используются две системы уравнений: Навье-Стокса и осредненных уравнений Навье-Стокса или уравнений Рейнольдса. Решение уравнений Навье-Стокса может быть выполнено либо методами прямого численного моделирования (the direct numerical simulation of turbulent flows - DNS), либо методами моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation - LES). Существуют также методы, в которых одновременно применяются оба этих метода, но для различных участков течения.

¹ Военно-морской инженерный институт (Санкт-Петербург)
© Слуцкая М.З., 2009

Прямое численное моделирование требует объема вычислений, который для натуральных течений превышает вычислительные возможности не только современных суперкомпьютеров, но и машин ближайших десятилетий. Менее требовательны к производительности ЭВМ *методы крупных вихрей*, однако и они могут быть реализованы для натуральных чисел Рейнольдса только на суперкомпьютерах или вычислительных кластерах высокой производительности за расчетное время, превышающее десятки часов и даже суток (в зависимости от условий задачи).

Подход, основанный на решении *осредненных уравнений Навье-Стокса - уравнений Рейнольдса* (Reynolds averaged Navier-Stokes - RANS), требует их замыкания с помощью той или иной полуэмпирической модели турбулентности. При этом возникает проблема, связанная с отсутствием универсальной, равно пригодной для всех типов течений (сдвиговых, отрывных и т.д.), модели. Вместе с тем для решения уравнений Рейнольдса требуется существенно меньше времени работы компьютера, чем для реализации метода LES и тем более метода DNS.

Однако для оперативного нахождения гидродинамических реакций, действующих на подводный объект в условиях нестационарности и неоднородности, все три названных подхода оказываются в настоящее время неприемлемыми, тем более если подобный расчет требуется выполнять на каждом шаге по времени при интегрировании дифференциальных уравнений движения объекта. При этом для достижения достаточной точности расчетный шаг должен быть относительно мелким (не более 0,1 с). Следовательно, процесс расчета динамики ПО, хотя бы в пределах периода прохождения одной внутренней волны, требует проведения расчетов тысячи раз.

Таким образом, для непосредственного использования при решении задач динамики подводных объектов в сложных гидрофизических условиях требуется разработка более экономичных методов расчета гидродинамических реакций. В настоящее время такие методы практически отсутствуют. В качестве исключения можно указать на приближенный метод расчета искомых реакций, действующих в поле внутренней волны, разработанный проф. Разумеенко Ю.В. [2].

Этот метод базируется на основных положениях линейной гидродинамической теории качки Крылова-Хаскинда, в соответствии с которой силовое воздействие внутренней волны на подводный объект можно представить в виде суммы трех составляющих:

- главной части возмущающих гидродинамических реакций, обусловленных давлениями в неискаженном поле волны в предположении о проницаемости тела;
- инерционно-демпфирующих реакций, обусловленных качкой тела на тихой воде;
- дифракционной реакции, обусловленной гидродинамическим взаимодействием тела с набегающими волнами, и разделяемой, в свою очередь, на инерционные и демпфирующие компоненты.

При известном поле гидродинамических давлений от внутренней волны вычисление главной части возмущающих реакций сводится к численному интегрированию указанных давлений по смоченной поверхности объекта, что не вызывает принципиальных затруднений при использовании компьютера и соответствующих программ.

Гораздо сложнее задача определения инерционно-демпфирующих и дифракционных реакций. Для их нахождения требуется выполнить достаточно сложный расчет течений, создаваемых телом произвольной формы при движении вблизи свободной поверхности. В методе Разумеенко Ю.В. такой расчет не выполняется, а для нахождения указанных реакций используются упрощенные зависимости, используемые в теории линейной качки надводных кораблей. Обоснованность такого прямого заимствования представляется недостаточной.

В настоящей работе предпринята попытка разработки математической модели, алгоритма и компьютерной программы, занимающей промежуточное положение между мето-

дами, основанными на решении уравнений движения вязкой жидкости, и приближенными методами, взятыми из теории качки. При этом ставилась цель получить модели, в которых были бы учтены основные особенности рассматриваемой задачи, такие, как неоднородность и нестационарность течения, его трехмерность, вязкость жидкости и реальная форма подводного объекта. Вместе с тем, обязательным условием являлась вычислительная экономичность математического и программного обеспечения, позволяющая эффективно решать поставленную задачу на ПК.

Постановка задачи и метод ее решения. Рассмотрим движение ПО, корпус которого представляет собой трехмерное тело произвольной формы, симметричное относительно диаметральной плоскости, в вязкой неоднородной по плотности несжимаемой жидкости, находящейся в движении под действием внутренних волн (рис. 1). В общем случае на объект могут оказывать влияние подводные течения и поверхностное волнение, однако в настоящей работе это влияние не учитывается. Требуется определить главный вектор $\vec{R}(t)$ и главный момент $\vec{M}(t)$ гидродинамических сил, действующих на объект в каждый момент времени t при заданном законе движения.

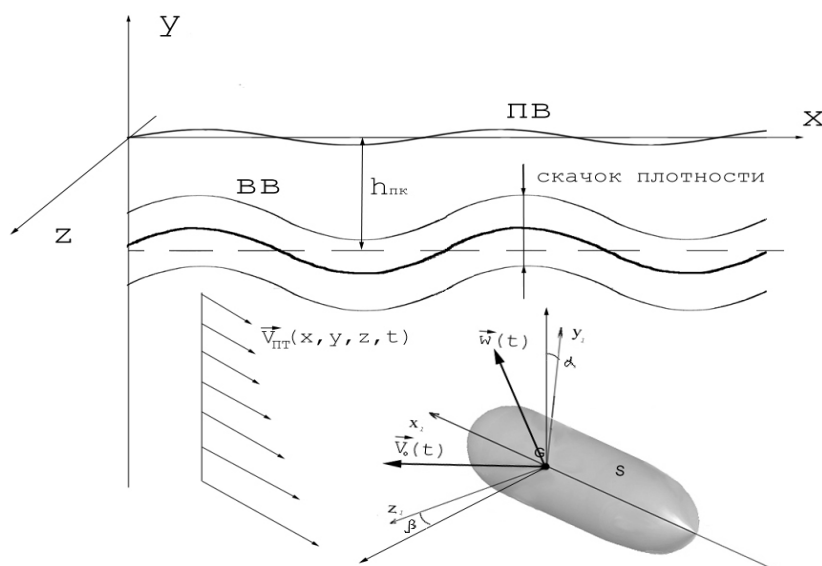


Рис. 1. К постановке задачи

Математическую модель гидродинамики ПО в условиях пространственно-временной неоднородности внешнего течения будем разрабатывать на основе модели прогнозирования гидродинамических реакций объекта, движущегося в однородной покоящейся жидкости [3]. В ней в качестве основных допущений приняты условия отсутствия вязкости жидкости и потенциальности вызванного течения. Опыт использования этой модели [4, 5] показал, что она обеспечивает удовлетвори-

тельную точность прогнозирования всех гидродинамических реакций за исключением силы сопротивления. Последнее ограничение очевидным образом связано с отказом от учета вязкости среды.

Допущение о потенциальном характере течения согласуется с современными моделями как поверхностных, так и внутренних волн, что позволяет создать единую гидродинамическую модель обтекания ПО неоднородным потоком. В рамках этой модели обобщенный потенциал течения $\Phi(X, Y, Z, t)$ (с учетом линейности задачи Неймана) можно представить как сумму потенциалов отдельных течений (принцип суперпозиции):

$$\Phi = \Phi_{\text{корп}} + \Phi_{\text{вихр}} + \Phi_{\text{ВВ}} \quad (1)$$

где $\Phi_{\text{корп}}$, $\Phi_{\text{вихр}}$ и $\Phi_{\text{ВВ}}$ - потенциалы, обусловленные вытесняющим воздействием корпуса на окружающую жидкость, а также его вихревой системой и внутренним волнением соответственно.

Потенциал $\Phi_{\text{корп}}$ представляется как потенциал непрерывного слоя источников-стоков, распределенного по поверхности корпуса S , потенциал $\Phi_{\text{вихр}}$ определяется по полю

скорости обтекания корпуса [3], потенциал Φ_{BB} должен включать две составляющие: первую, обусловленную свободными внутренними волнами, существующими независимо от ПО, и вторую, отвечающую вынужденному волнению, вызванному наличием объекта.

Известно, что на создание вынужденного волнения затрачивается значительная энергия, что приводит к появлению дополнительного волнового сопротивления [6]. Вместе с тем вопрос оценки влияния вынужденных волн на другие гидродинамические реакции, например, продольный момент и подъемную силу, изучен значительно меньше. Учитывая это, в работе были выполнены исследования влияния вызванного волнения на гидродинамические характеристики эллипсоида удлинения b , движущегося внутри размытого скачка плотности с углами атаки от 0 до 30°. Для этого использовалась программа расчета вязких турбулентных течений «FlowFES» (метод крупных вихрей, автор программы Ткаченко И.В.). Эллипсоид двигался с постоянной скоростью внутри размытого скачка плотности при числе Рейнольдса $Re = 4.2 \cdot 10^6$. Расчетная сетка состояла из 1.8 миллионов ячеек.

Полученные расчетные данные свидетельствуют о том, что данное влияние оказывается мало заметным. По сравнению с движением в безграничной вязкой жидкости подъемная сила изменяется не более чем на 2-3%, а момент – на 1%. Причем, здесь указаны максимальные значения изменений, достигаемые при предельно малых углах атаки (1-2 градуса). С ростом этого угла влияние вызванных внутренних волн становится еще меньше. Это позволяет ограничиться рассмотрением движения объекта в так называемом номинальном поле внутренних волн, т.е. в поле свободных волн, не искаженных присутствием корпуса.

Исследования внутренних волн показывают многообразие их пространственно-временных характеристик [1, 6]. Вместе с тем установлено, что на движение подводного объекта существенное воздействие оказывают гравитационные волны, близкие по форме к синусоидальным волнам, возникающие на резком пикноклине малой толщины, имеющие относительно малый период (менее 20 мин.) и большую высоту [2]. Учитывая сказанное, воспользуемся относительно простой моделью с одномодовой структурой, хорошо соответствующей волнам на так называемом резком пикноклине. В пределе, в этом случае пикноклин можно считать выродившимся в линию, на которой и происходит скачкообразное изменение плотности воды от величины ρ_1 к величине ρ_2 . Частота этих волн близка к частоте Вайсяля-Брента.

При определенных допущениях задачу определения гидродинамических характеристик таких волн можно решить теоретически [7]. В этом случае потенциалы волнового течения над (индекс 1) и под (индекс 2) скачком плотности будут определяться с помощью следующих зависимостей:

$$\varphi_1 = -\frac{a\omega \operatorname{ch}k(y-H_1)}{k \operatorname{sh}kH_1} \sin(kx - \omega t), \quad \varphi_2 = \frac{a\omega \operatorname{ch}k(y+H_2)}{k \operatorname{sh}kH_2} \sin(kx - \omega t).$$

Для использования полученных формул необходимо задать амплитуду волны a , длину волны λ , плотности верхней ρ_1 и нижней ρ_2 жидкости, расстояние от скачка плотности до свободной поверхности H_1 и до плоского дна H_2 . Полученное решение позволяет в рамках принятых допущений определить волновой потенциал Φ_{BB} , входящий в (1).

Для определения остальных потенциалов, входящих в эту формулу, был использован метод, разработанный на базе метода, изложенного в [3, 4]. Принципиальное отличие нового метода состоит в учете нестационарности движения объекта в неоднородном во времени и пространстве поле скорости внутренней волны. Этот учет потребовал существенного изменения математической модели, алгоритма и компьютерной программы, что позволяет говорить практически о новой модели с существенно расширенными возможностями.

Не останавливаясь на деталях численной процедуры, отметим, что с вычислительной точки зрения поставленная задача сводится, в первую очередь, к решению интегрального уравнения типа Фредгольма 2-го рода для определения интенсивности простого слоя q , моделирующего вытесняющее воздействие корпуса на жидкость:

$$2\pi q(P) + \int_S q(Q) \frac{\vec{r} \cdot \vec{n}}{r^3} dS = (\vec{V}_0 + \vec{\omega} \times \vec{r}_0 - \vec{W}_{вихр} - \vec{U}_{ВВ}) \cdot \vec{n},$$

где \vec{V}_0 – поступательная скорость начала координат, принятого за полюс объекта, и $\vec{\omega}$ – угловая скорость вращения вокруг мгновенной оси, проходящей через полюс, $\vec{W}_{вихр}$ – скорость, вызванная вихревой системой корпуса, P и Q – соответственно расчетная и текущая точки поверхности, $\vec{r} = |\overline{QP}|$, S – смоченная поверхность корпуса ПО.

Для стационарного течения процедура построения вихревой системы корпуса и расчета ее параметров изложены в работах [3, 4]. В этом случае циркуляции всех нитей вихревой системы корпуса будут постоянны во времени. Однако ситуация существенно усложняется, если объект движется с переменной скоростью или в неоднородном и/или нестационарном потоке, здесь указанная циркуляция будет переменной во времени. Это обстоятельство приводит к усложнению вихревой системы, моделирующей реальную завихренность в пограничном слое и следе объекта.

Согласно теореме Томпсона [8] в невязкой несжимаемой жидкости, находящейся под действием потенциальных массовых сил, циркуляция скорости по произвольному замкнутому жидкому контуру с течением времени не изменяется. Для обеспечения требования этой теоремы необходимо ввести дополнительные вихри, непрерывно появляющиеся в потоке и компенсирующие изменение циркуляции основных вихрей, чтобы суммарная циркуляция всех вихрей оставалась постоянной. После соответствующей модернизации исходной вихревой модели [3] возникает проблема вычисления потенциала $\Phi_{вихр}$ новой системы. Это объясняется тем, что вихревой отрезок, являющийся основополагающим элементом этой системы, потенциала не имеет, хотя в некоторых источниках, например, в монографии [9], ошибочно утверждается обратное. Вместе с тем доказано [10], что течение, вызванное замкнутыми вихревыми структурами, составленными из вихревых отрезков одинаковой интенсивности, является потенциальным. Обладает потенциалом и П-образный вихрь.

Исходя из этого была использована специальная процедура введения фиктивных, взаимно компенсирующих друг друга вихревых отрезков, превращающих исходную вихревую систему в систему, состоящую из конечного числа замкнутых элементов – вихревых треугольников. Такая замена не изменяет гидродинамических характеристик вихревой системы, но позволяет вычислить вызванный потенциал и скорости.

После нахождения всех потенциалов рассматриваемой задачи могут быть вычислены скорости жидкости в любых точках течения. Зная эти кинематические характеристики, избыточные гидродинамические давления $(p - p_0)$ можно определить с помощью интеграла Коши-Лагранжа [8], записанного в подвижной, связанной с объектом системе координат:

$$\frac{p - p_0}{\rho} = \text{grad } \Phi \cdot \vec{u}_{неп} - \frac{U^2}{2} - \frac{\partial \Phi}{\partial t},$$

где U – скорость жидкости в расчетной точке; $\vec{u}_{неп}$ – переносная скорость этой точки.

Гидродинамические силы и моменты, действующие на объект, определяются интегрированием этих давлений по его поверхности S :

$$\vec{R} = \int_S (p - p_0) \vec{n} dS; \vec{M} = \int_S (p - p_0) (\vec{r} \times \vec{n}) dS.$$

Безразмерные коэффициенты этих реакций получены отнесением размерных значений к скоростному напору и объемному водоизмещению для момента и объемному водоизмещению в степени 2/3 для силы.

Результаты расчетов. На основе изложенной модели была разработана компьютерная программа на алгоритмическом языке FORTRAN 95. Для апробации модели, алгоритма и программы были проведены многочисленные тестовые расчеты, показавшие адекватность и удовлетворительную точность получаемых результатов.

В качестве примера определения гидродинамических реакций в поле внутренней волны был выполнен расчет схематизированного корпуса ПО удлинения 8.43 при движении с постоянной скоростью под углом атаки 4°. Внутренняя волна имела амплитуду 5.0 м, длину 400.0 м и возникла на резком пикноклине, плотность при переходе через который изменялась от 1024 до 1026 кг/м³. Пикноклин был расположен на глубине 30 м, а расстояние от него до дна – 50 м. Объект находится на глубине 50 м.

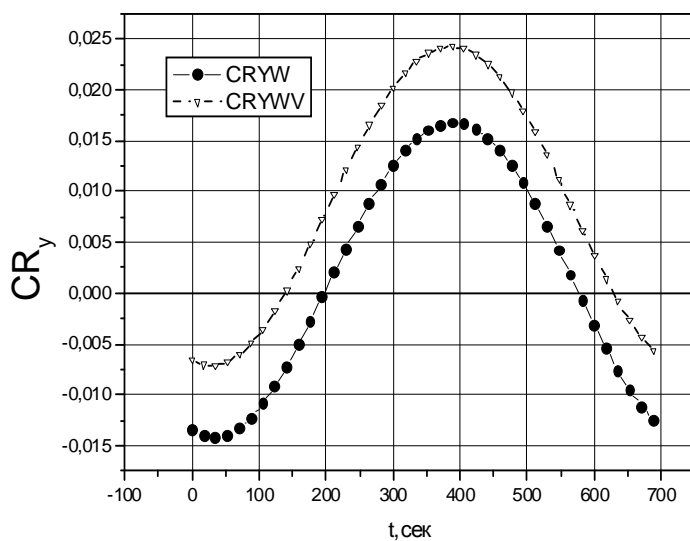


Рис. 2. Зависимость коэффициента нормальной силы от времени

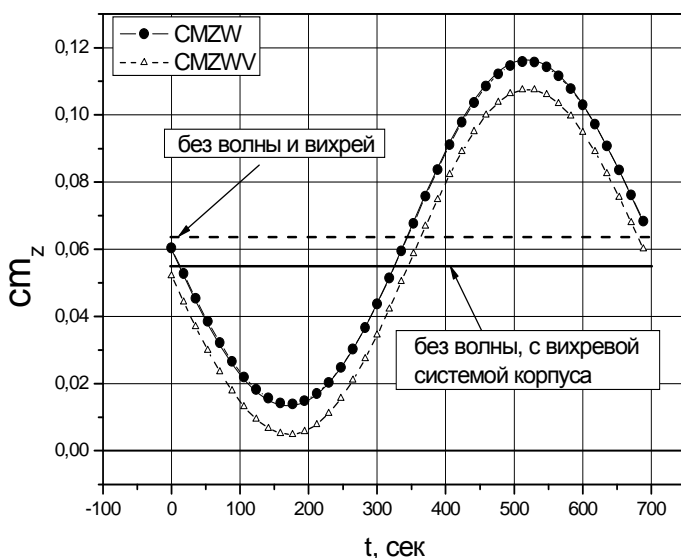


Рис. 3. Зависимость коэффициента продольного момента от времени

расстояние от него до дна – 50 м. Объект находится на глубине 50 м.

На рис. 2 и 3 показан характер изменения безразмерных коэффициентов нормальной силы и продольного момента объекта в пределах периода волны (около 700 с) для различных условий.

На рис. 2 приведены графики изменения коэффициента нормальной силы для двух расчетных схем. Штриховая линия с кружками, отмечающими расчетные значения, соответствует движению корпуса без вихревой системы, т.е. без учета вязкости, а вторая линия – с учетом вязкости. Видно, что в обоих случаях влияние волны качественно одинаково, отличаются только численные значения. Важно отметить очень сильное воздействие волны, приводящее даже к изменению знака силы.

На графиках рис. 3 показано изменение коэффициента продольного момента в тех же условиях. Здесь также нанесены две горизонтальные линии – штриховая и сплошная – соответствуют величине момента, действующего на объект в отсутствии волнения. В этом случае момент не зависит от времени. Видно, что наличие вихрей, т.е. учет вязкости, приводит к некоторому уменьшению величины момента по сравнению с безвихревым его обтеканием, что соответствует физике явления. Поле волны очень

волны очень существенно изменяет величину момента по сравнению с движением объекта в покоящейся жидкости. Амплитуда колебаний близка к значению момента в безволновом потоке.

Следует отметить высокую скорость выполнения расчетов по разработанной программе: представленные на рисунке результаты были получены за 4.5 мин работы ПК с процессором Pentium-4 3000 МГц.

* * *

Полученные результаты показывают, что предложенная математическая модель и компьютерная программа позволяют прогнозировать гидродинамические реакции, действующие на подводные объекты в поле внутренних волн, и могут быть использованы в практике проектирования и при создании тренажеров для имитации движения этих объектов в сложных гидрофизических условиях.

Литература

1. *Миропольский Ю.В.* Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 302 с.
2. Отчет по НИР «Аномалия». СПб.: СПбНЦ РАН, 2006.
3. *Гурьев Ю.В., Красиков В.И., Слуцкая М.З.* Прогнозирование гидродинамических реакций в задачах динамики подводных объектов с учетом гидрофизических полей океана // Труды VIII-ой Международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2006.
4. *Гурьев Ю.В., Красиков В.И., Слуцкая М.З.* Выбор перспективных моделей гидродинамики подводных объектов для решения задач динамики в реальных гидрофизических условиях Мирового океана // Материалы межвузовской научной конференции «Совершенствование подготовки инженерных кадров ВМФ по предупреждению аварийности на Флоте». СПб.: ВМИИ, 2007.
5. *Гурьев Ю.В. и др.* Прогнозирование параметров управляемости подводных объектов методами вычислительной гидродинамики // Материалы Международной конференции по морским интеллектуальным технологиям «МОРИНТЕХ'2005». СПб. 2005.
6. *Васильева В.В., Шкадова С.В.* Внутренние волны: Учебное пособие. СПб.: СПбГМТУ. 2001. 80 с.
7. *Кочин Н.Е., Кибель И.Л., Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика. Т.1. М.-Л.: ОГИЗ, 1948.
8. *Войткунский Я.И., Фаддеев Ю.И., Федяевский К.К.* Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 455 с.
9. *Белоцерковский С.М., Ништ Н.И.* Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. М.: Наука, 1978.
10. *Бабкин В.И., Белоцерковский С.М., Гуляев В.В., Дворак А.В.* Струи и несущие поверхности. Моделирование на ЭВМ. М.: Наука, 1989.

Статья поступила в редакцию 28.07.2008 г.