



Применение *COMSOL Multiphysics* для расчета гидродинамического поля сетных орудий рыболовства

Канд. техн. наук Л.Е. Мейлер – Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

О том, что достоверная оценка величин и распределений давления и скоростей потока внутри и вокруг орудия рыболовства (трала, ставной ловушки, невода и т.п.) необходима, исследователи и конструкторы говорят уже много лет, и большое количество публикаций на эту тему является тому подтверждением. Научный интерес фокусируется как на качественном, так и на количественном анализе влияния сетной конструкции на поток вокруг нее [Paschen M. *Flow investigations of net cones*/ M. Paschen, H-J. Winkel// *Methods for the development and evaluation of maritime technologies (DEMaT '99): Proceedings of the 4-th international workshop. Rostock. 1999. P. 197–216*].

В ранних исследованиях применялись в основном экспериментальные методы определения параметров потока. В дальнейшем стали использоваться математические модели, которые базировались на гидравлической теории фильтрации, на допущении как невозмущенного потока жидкости через сетную конструкцию, так и турбулентного, с сопротивлением трения вдоль стенок и сопротивлением потоку сквозь ячей. Подобные модели описывают распределение скоростей или давлений в жидкости и позволяют приблизительно рассчитывать скорости потока внутри и вне оболочки орудия лова. В частности, для описания потока через сетную поверхность можно использовать математическую модель потока жидкости через так называемую «проницаемую поверхность» [Рахматуллин Х.А. *Обтекание проницаемого тела*// «Вестник МГУ», Серия физ.-мат. и естеств. наук. М., 1950, № 3. С. 41–55]. Схема потока через проницаемую поверхность показана на рис. 1.

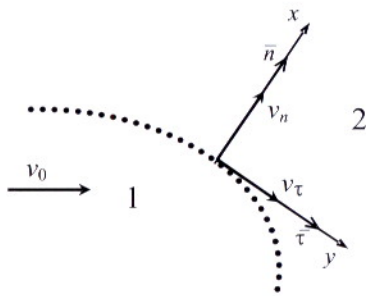


Рис. 1. Схема потока через проницаемую поверхность

Взаимодействие между набегающим потоком и проницаемой поверхностью происходит под влиянием перепада давления Δp и зависит как от однородности распределения ячеек на поверхности, так и от их числа и угла направления вектора скорости потока. Процесс протекания жидкости через проницаемую поверхность подчиняется законам, которые определяют влияние поверхности на частицы жидкости:

сохранения массы

$$\rho_1 \cdot v_{1n} = \rho_2 \cdot v_{2n}, \quad (1)$$

сохранения импульса

$$\rho_1 \cdot v_{1n} \cdot (v_{2n} - v_{1n}) = p_1 - p_2 - R_n, \quad (2)$$

$$\rho_1 \cdot v_{1n} \cdot (v_{2\tau} - v_{1\tau}) = -R_\tau,$$

сохранения энергии

$$\rho_1 \cdot v_{1n} \cdot \left(\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right) = p_1 \cdot v_{1n} - p_2 \cdot v_{2n} - \bar{R} \cdot \frac{\bar{v}_1 + \bar{v}_2}{2}, \quad (3)$$

где: ρ_1, ρ_2 – плотности жидкости; v_{1n}, v_{2n} – проекции скорости частицы на нормаль \vec{n} ; v_1, v_2 – модули скоростей; p_1, p_2 – давления; R_n, R_τ – нормальные и тангенциальные компоненты силы воздействия потока жидкости на единицу площади проницаемой поверхности; \bar{R} – результирующий вектор компонентов R_n, R_τ .

Зоны 1 и 2 на рис. 1 и нижние индексы в уравнениях (1–3) определяют параметры потока перед проницаемой поверхностью и позади нее.

Если рассматривать сетное орудие рыболовства, например, трал или и его отдельные элементы как такую сетную поверхность, то представляется возможным при установившемся движении использовать допущения о том, что поток вокруг нее имеет некоторые определенные особенности, а именно:

- а) *сохранение формы*, т.е. форма сетной конструкции фактически неизменяема в потоке;
- б) *формирование сетной конструкции*, т.е. она сама «выбирает» такую форму при раскрытии, когда перепад давления на большей части ее поверхности $\Delta p = p_1 - p_2 = \text{const}$;
- в) *наличие определенной проницаемости*, которая является главным фактором стабилизации потока вокруг сетной конструкции. Граничные условия должны определяться с учетом реальных свойств протекания жидкости через сетную поверхность. Причем, особый интерес, как показано во многих исследованиях, например, в работе [Vincent B. *Computation of flow field in the codend*/ B. Vincent, D. Marichal// ICES FTFB Working group Meeting, Woods Hole, 1996], с точки зрения селективности, вызывает гидродинамическое поле в траловом мешке. Поток обуславливает гидродинамические силы, от которых зависит геометрия ячеек. А изменение скоростей потока наиболее явно проявляется в траловом мешке. При этом, как показывают эксперименты, поток в начале трала, где проницаемость сетного полотна достаточно велика, можно считать однородным и имеющим практически постоянную скорость.

На рис. 2 приведено распределение скоростей модели трала, полученное в результате экспериментов в гидроканале [Белов В.А. *Течение воды в трале*// Тезисы Всесоюзного научно-технического семинара по гидродинамике и проектированию орудий лова. Калининград, 1987. С. 110–115].

Обоснование методов расчета гидродинамического поля в орудиях лова является предметом исследований последнего времени. Анализ некоторых теоретических моделей приведен в работе [O'Neill F.G. *Evaluation of three source panel models of flow through partially blocked netting*/ *Methods for the development and evaluation of maritime technologies (DEMaT '05): Proceedings of the 7-th international workshop. Busan, 2005. P. 337–345*]. При этом в задачах обтекания различных тел все чаще используются численные методы расчета, базирующиеся на решении уравнений математической физики. Это так называемые «методы компьютерного расчета динамики потока» – CFD (Computational Flow Dynamics),

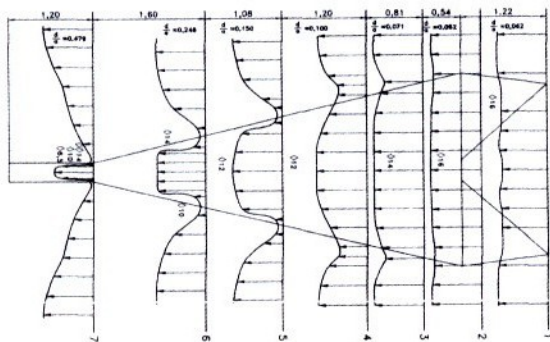


Рис. 2. Распределение скоростей потока вокруг модели трала

основанные на FEM (Finite Element Method) – методе конечных элементов.

Известны такие программы, как ANSYS, FLOW-3D, FLUENT, с помощью которых моделируются разнообразные течения жидкости: со свободной поверхностью; ограниченные границами; внутреннее. Однако моделирование в этих пакетах трудоемко и занимает много времени, в основном для определения геометрии и параметров конечно-элементной сетки в соответствии с заданной моделью объекта и близлежащего поля.

Программа FEMLAB и ее последняя версия – COMSOL Multiphysics [http://www.comsol.com/] – пакет, дающий возможность решать многие виды научных и технических задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных PDE (Partial Differential Equations). Девиз этой программы – моделирование за минуты, а не за дни и недели!

Пользователи могут создавать модель тела, не прибегая к написанию программ, а тем более, к их корректировке при изменении характеристик объекта. Можно использовать встроенную библиотеку, которая включает более 200 полностью решенных и документированных моделей, видоизменяя геометрию и систему уравнений под свои задачи, что очень сложно делать в других программных пакетах. Есть возможность сочетать и взаимно увязывать любые виды физических явлений (перенос тепла, акустика, диффузия, гидродинамика и т.п.), создавая уникальную мультифизическую модель. Доступ к этой возможности не требует глубокого знания математики, что очень важно для инженера или конструктора, решающего конкретные задачи.

Используя встроенные физические прикладные режимы, можно формировать модели, задавая необходимые параметры материальных свойств объекта, характеристик потока, нагрузок, ограничений и т.п., не определяя явно основные уравнения, поскольку данный программный пакет в этих режимах внутренними средствами формирует систему PDE, описывающих модель.

Естественно, учитывая описанные преимущества данного программного пакета, задаться вопросом: можно ли с его помощью рассчитывать гидродинамическое поле таких сетных конструкций, как орудия рыболовства? Известно, что несжимаемый поток жидкости описывается уравнениями Навье-Стокса, состоящими из баланса количества движения (импульса) при выполнении закона сохранения масс и условия несжимаемости:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\text{grad } p + \text{div}(\mathbf{v} \cdot (\nabla \otimes \mathbf{u} + \text{grad } \mathbf{u})) + \mathbf{F} \\ \text{div } \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mathbf{u} = i_x \cdot u + i_y \cdot v; \quad \nabla = i_x \frac{\partial}{\partial x} + i_y \frac{\partial}{\partial y};$$

где: ρ – плотность жидкости; \mathbf{u} – векторное поле скоростей; i_x, i_y

– единичные векторы системы координат; p – давление; \mathbf{v} – динамическая вязкость; \mathbf{F} – векторное поле объемной плотности силы; ∇ – векторный пространственный дифференциальный оператор первого порядка.

Эти уравнения используются в COMSOL Multiphysics для решения задач динамики жидкости при обтекании тел. В работе [Enerhaug B. Experimental, numerical and analytical studies of flow through reticulate and solid cones/ B. Enerhaug, S.H. Gjususund, K. Hansen// Proceedings of the 5-th international workshop on methods for the development and evaluation of maritime technologies (DEMaT '01). Rostock, 2001. Vol. 2. P. 43–59] приведены результаты экспериментального исследования в гидроканале обтекания сетных конусов с различной степенью проницаемости и оценки распределения скоростей, проводившейся с помощью программы FEMLAB на «идеализированной» двухмерной модели. К сожалению, была дана только качественная картина обтекания такой модели, но сравнения с экспериментальными данными не приведено.

Авторы считают, что результаты численного моделирования пригодны только для иллюстрации общих физических принципов, а практическая применимость такого способа будет сильно зависеть от динамики конуса, его оснастки, однородности набегающего потока, завихрений в следе. С этим трудно спорить, но, если принять вышеупомянутое допущение о стабильности в потоке формы сетной конструкции как проницаемой поверхности, то удовлетворительная сходимость результатов численного расчета и модельных или натуральных экспериментальных исследований может быть, по нашему мнению, основанием не только иллюстративности, но и расчета параметров гидродинамического поля.

Чтобы удостовериться в этом, была проведена оценка расчетных параметров сетной конструкции и результатов экспериментальных исследований. Ранее [Мейлер Л.Е. Поле скоростей в схематизированной сетной конструкции// Труды международной научно-техн. конфер., посвящ. 70-летию КГТУ. Калининград, 2000. Т. 2. С. 346–347; Мейлер Л.Е. Схематизированные сетные конструкции для исследования поля скоростей в орудиях рыболовства// «Рыбное хозяйство», 2005, № 4. С. 63–64] на схематизированных сетных конструкциях (ССК) посредством лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) были измерены скорости потока внутри и вне макетов сетных цилиндров, конусов и их комбинаций. При этом предполагалось, что можно, учитывая осесимметричность таких конструкций, как траловый мешок, моделировать поток внутри и вокруг сетной конструкции в тонком поперечном или продольном сечении. Основываясь на этом предположении, боковые стенки ССК были сетными, а верхняя поверхность – прозрачной, что было необходимо для прохода лазерных лучей и измерения скоростей потока в определенных точках.

Для расчета гидродинамического поля с помощью программы COMSOL Multiphysics была использована такая же, как и в работе [Enerhaug B. Experimental, numerical and analytical studies of flow through reticulate and solid cones/ B. Enerhaug, S.H. Gjususund, K. Hansen// Proceedings of the 5-th international workshop on methods for the development and evaluation of maritime technologies (DEMaT '01). Rostock, 2001. Vol. 2. P. 43–59], схематизация сетной конструкции. То есть рассматривалась двухмерная геометрия, и поперечные сечения нитей заменялись набором сечений цилиндрических сечений, можно имитировать диаметр нитей и шаг ячеей сети, а также форму конструкции, например, цилиндрическую или коническую. Схемы расчетных моделей сетных конструкций показаны на рис. 3.

Все параметры расчетных моделей были аналогичны параметрам ССК в экспериментах. Длина $L = 1,4$ м; диаметр нити $d = 2,5$ мм; шаг ячеей $a = 25$ мм; начальный диаметр у всех моделей $D = 0,3$ м.

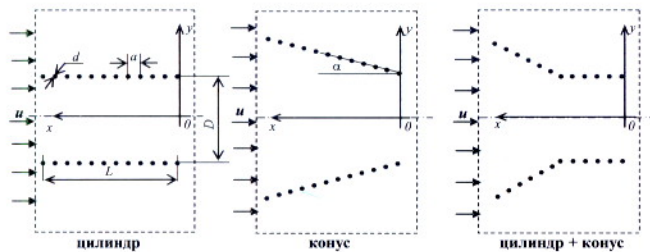


Рис. 3. Схема моделей сетных конструкций

В графическом интерфейсе пользователя (GUI) программы прорисовывается схема каждой модели и формируется поле скорости потока. На рис. 3 это поле показано в виде пунктирного прямоугольника. Граничные условия: слева – набегающий поток (inflow): $u = u_0$. В нашем случае принято $u_0 = 1,0$ м/с, а начальное давление $p_0 = 0$. На верхней и нижней сторонах скоростного поля задается свободное протекание (neutral). Как показал анализ, эти стороны следует располагать на значительном расстоянии от модели (в нашем случае – на 20 м), с тем чтобы границы потока не оказывали влияния на поле скоростей вокруг модели. На правой стороне задается граничное условие – исходящий поток/давление (outflow/pressure). Условия непротекания (no slip): $u = 0$ – задаются на границах круговых сечений – «нитей».

Как отмечено выше, большим преимуществом программы является автоматический режим генерации конечно-элементной сетки при заданных граничных условиях течения. Затем в режиме нелинейного решателя рассчитывается поле скоростей потока и давлений.

На рис. 4, а показаны расчетные эпюры скоростей для модели – «закрытый цилиндр», т.е. имеется «сетная стенка» на выходе. На рис. 4, б – сравнение расчетных зависимостей относительной продольной скорости (сплошные линии) и экспериментальных данных (символы того же цвета), полученных в исследовании ССК от относительной длины x/L и относительного «диаметра» $\bar{y} = \frac{y}{2D}$. Цветовая шкала позволяет оценить качественную картину обтекания, а сравнение расчетных и экспериментальных данных свидетельствует об их незначительном расхождении. Программа позволяет получить зависимости скорости и давле-

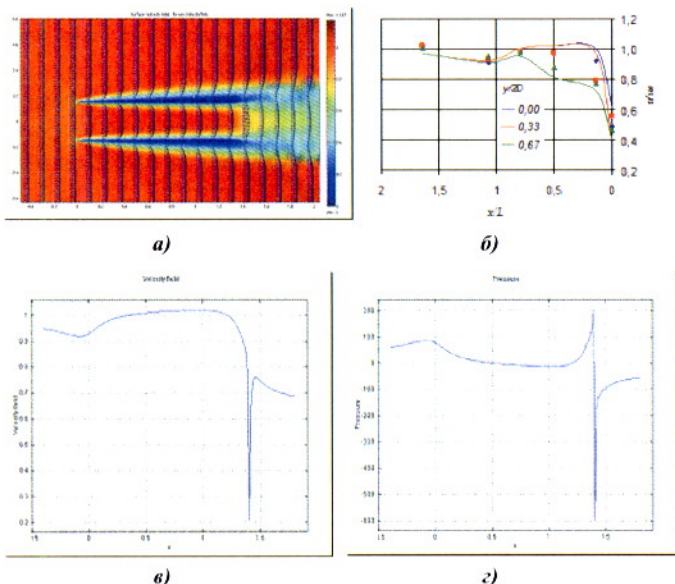


Рис. 4. Расчетное поле скоростей потока модели «закрытый цилиндр» и сравнение с экспериментальными данными

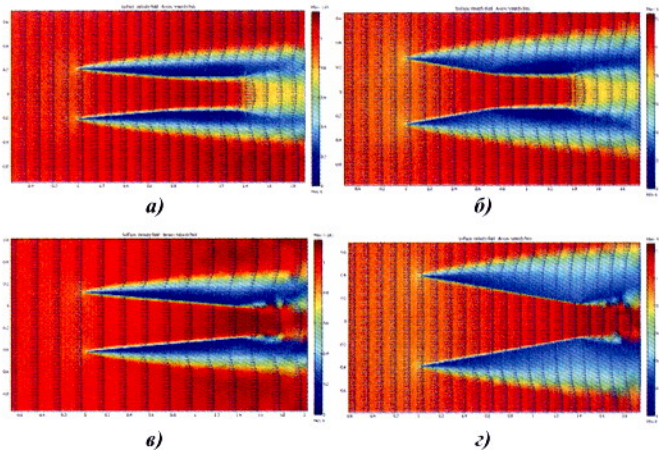


Рис. 5. Эпюры скоростей обтекания различных моделей сетных конструкций: а – закрытый цилиндр + конус ($\alpha = 5^\circ$); б – закрытый цилиндр и конус ($\alpha = 10^\circ$); в – открытый конус ($\alpha = 5^\circ$); г – открытый конус ($\alpha = 10^\circ$)

ния в любом сечении расчетной модели, что для продольной оси $\bar{y} = 0$ показано на рис. 4, в и г.

Удовлетворительная сходимость экспериментальных и расчетных данных также отмечена и для других вариантов моделей. Расчетные эпюры для некоторых из них показаны на рис. 5, а – г. По этим рисункам можно оценить не только численные значения скоростей, но и характерные особенности обтекания. Допуская, что подобные сетные элементы являются составными частями трала и «суммируя» их гидродинамические поля, можно оценить такое поле и для всего трала. Конечно, нельзя забывать, что указанные выше допущения могут привести к большей погрешности расчетных параметров, особенно когда траловый мешок имеет различные стадии заполнения объектами лова.

Тем не менее, результаты исследований, проведенные на моделях – аналогах ССК, позволяют сделать вывод о возможности оценки гидродинамического поля сетных конструкций. В дальнейшем следует оценить сходимость расчетных параметров с измерениями скоростей и давлений, сделанными на реальных тралах, отдельных их элементах, таких, как траловый мешок, или их моделях.

Meyler L.E.

Application of COMSOL Multiphysics for calculation of hydrodynamic field of net gears

The author presents the last version of FEMLAB program – COMSOL Multiphysics. The program deals with numeric methods based on solution of equations of mathematical physics – so called CFD methods (Computational Flow Dynamics) based on FEM (Finite Element Method).

COMSOL Multiphysics makes it possible to solve a lot of technical and scientific tasks based on partial differential equations PDE. The program users are able to create a body model not writing programs or, even more so, not correcting them when the object characteristics change. Any physical phenomenon may be combined and coordinated with others (heat transport, acoustics, diffusion, hydrodynamics, etc.) forming a unique multiphysical model.