УДК 532.52

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБТЕКАНИЯ СИММЕТРИЧНОГО ГИДРОКРЫЛА

© 2021 г. Е. Žic^{*a*,*}, Р. Černeka^{*a*,**}, and I. Biluš^{*b*,***}

^a University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering, Rijeka, Croatia ^b University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Slovenia *E-mail: elvis.zic@uniri.hr **E-mail: petra.cerneka@student.uniri.hr ***E-mail: ignacijo.bilus@um.si Поступила в редакцию 17.12.2020 г. После доработки 24.12.2020 г. Принята к публикации 25.12.2020 г.

Цель данной работы состоит в гидродинамическом анализе течения жидкости вокруг симметричного трехмерного гидропрофиля на основе физической лабораторной модели НМ133 и демонстрации формирования пограничного слоя и точек отрыва на рассматриваемом теле. Анализ выполнен таким образом, чтобы геометрическое тело внутри измерительной секции физической модели НМ133 могло вращаться вокруг своей вертикальной оси из-за потока жидкости (вода), что приводит к различному потенциальному виду перед и за наблюдаемым телом. Исследования проведены в рамках Гидротехнического лабораторного практикума на Факультете строительства гражданских сооружений в Университете Риеки. Исследования лежат в поле реальной гидродинамики, включающей описание ламинарного и турбулентного течений на плоской поверхности, формирование пограничного слоя и возникновения точки отрыва на наблюдаемом теле. В этом исследовании детально анализируются как сам пограничный слой, так и его свойства. Гидродинамический анализ, основанный на тестовых подмоделях гидрокрыла для физической модели НМ133. был проверен на достоверность и подтвержден с помощью вычислительной гидродинамики. Проведенный анализ опирается на развитие коммерческих численных моделей в рамках компьютерного пакета программ ANSYS Fluent 2020R1.

Ключевые слова: гидрокрыло, физическая модель HM133, численное моделирование, пограничный слой, точка отрыва потока, ANSYS Fluent 2020R1 **DOI:** 10.31857/S0568528121040137

Обтекание плоских и искривленных двух- и трехмерных тел жидкостью является предметом многочисленных экспериментальных исследований из-за важности таких течений для технического определения параметров, проектирования и конструирования объектов в космосе [1, 2]. Обтекание жидкостью одиночных прямых или искривленных объектов проливает свет на ряд важных физических явлений, таких как отрыв потока, образование вихрей и турбулентность. Ряд практически важных механических свойств, включая силы трения, подъемные силы и коэффициенты давления, существенно влияют на механизм образования вихрей [3]. Чтобы лучше понять сложность турбулентных течений около таких объектов, были введены инновационные численные методики и методы расчета. Вычислительная гидродинамика является полезным инструментом для демонстрации полей течения, основываясь на котором векторные и контурные представления изменений отдельных физических величин могут быть показаны в результате численного моделирования [4–6].

Явление высвобождения вихрей в различных формах является чрезвычайно важным из-за его физических приложений и его появление может вызвать серьезное повреждение различных построек (подмыв баласта на подошве устоев речного моста, вибрации мостовых конструкций и многоэтажных зданий, разрушение конструктивных элементов крыши, кавитацию в водяных, паровых и газовых турбинах и т.д.). Явление схода вихрей тщательно учитывается в строительстве [7, 8]. Сход вихрей может быть определен как периодический отрыв пар перемежающихся вихрей, которые формируют тело, обтекаемое потоком жидкости, создавя пульсирующее тече-

ŽIC и др.

ние, которое имеет место, когда некоторая текучая среда (например, воздух иди вода) обтекает тело на некоторой скорости, которая зависит от размеров и формы самого тела. В зависимости от значений числа Рейнольдса Re. обтекание геометрического тела может быть описано следующими режимами: 1) при $190 < \text{Re} < 3 \times 10^5$ – докритический режим (происходит ламинарный отрыв): 2) при $3 \times 10^5 < \text{Re} < 3 \times 10^6$ – переходный режим (происходят даминарный отрыв и турбулентное присоединение); и 3) при Re > 3 × 10⁶ – сверхкритический режим (турбулентный отрыв) [9, 10]. Явление "отрыва" или "высвобождения" вихрей является одним из наиболее сложных в турбулентных течениях. По этой причине частота эжекции различных произвольных тел внутри самого вихря используется для измерения скорости потока во время завихренного течения. Хотя масштаб вихря хорошо изучен и многочисленные исследования проводились в течение многих лет, природа вихревого процесса все еще не понята полностью. В последние 20 лет были предложены разные методы управления динамикой вихревых (турбулентных) потоков, но, к сожалению, модели турбулентности все еще не совсем корректно описывают явление турбулентного "экранирования" вихрей. На настоящий момент обтекание отдельных геометрических тел при больших числах Рейнольдса можно оценить очень надежно с использованием численного моделирования методами вычислительной гидродинамики [1, 7].

В настоящей работе выполнен гидродинамический анализ течения воды вокруг симметричного гидрокрыла. С помощью лабораторной физической модели HM133 наблюдалось формирование пограничного слоя вокруг геометрического тела специальной формы, а также положение точки отрыва на рассмотренном профиле. Модель была протестирована при контролируемых услових в рамках Гидротехнического практикума факультета строительства гражданских сооружений Университета Риеки. Для геометрического тела гидрокрыла реализовано несколько вариантов течения воды за счет развития физических и численных моделей для выполнения гидродинамического анализа водяного потока. На основе численных моделей изучены эффекты изменений полей скорости, давления и турбулентной вязкости.

1. ПРЕДЫДУЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из первых ученых, описавших явление схода вихрей, был Леонардо да Винчи, который нарисовал несколько довольно точных набросков образования вихрей в потоке за некоторым произвольным телом. Образование вихревого течения около тела было описано Теодором фон Карманом в 1911 г. [11]. В своих научных и профессиональных исследованиях научные работники анализируют различные аспекты гидродинамики потока вокруг гидрокрыла, следствием чего являются характеристики его профилей. Пропорции самого гидрокрыла и форма его кончиков могут привести к более низким значениям соотношений между подъемными силами и некоторому уменьшению эффективности гидрокрыла. В [12] для исследования кавитационного облака вокруг колеблющегося гидрокрыла были использованы высокоскоростные видеокамеры и датчики давления и был проанализирован механизм переходных импульсов давления вблизи кавитационной полости. В [13] за счет комбинирования экспериментальных и численных методов было проанализировано обтекание гидропрофиля NACA0015 при наличии различных типов кавитации от рыхлой до облачной. В [14] были проанализированы характеристики двумерных гидропрофилей ниже поверхности воды на основе распределения источников на невозмущенной водной поверхности с использованием граничного условия Дирихле. В [15] был развит метод потенциально направленной пластины для анализа трехмерных гидрокрыльев ниже поверхности воды, тогда как в [16] проанализирована форма гидрокрыла, движущегося непосредственно под поверхностью воды, и найдена его эффективность в уменьшении сил трения и сопротивления. В этой работе анализировались значения коэффициентов сопротивления для формы, зависящие от распределения давления на поверхности крыла, а также коэффициентов выталкивающей силы и сил трения для разных значений числа Фруда. В [17] моделировался режим суперкавитации на гидрокрыле под поверхностью воды и оказалось, что можно применить уточненный по времени многофазный метод моделирования уравнений Навье-Стокса, чтобы моделировать кавитационные режимы около поверхности воды. В [18] были представлены численные характеристики нового типа гидрокрыла, разработанного для оптимизации коэффициента полезного действия при условиях суперкавитации, включая переходный режим. Численные расчеты подтвердили превосходящие качества нового гидрокрыла, которое может достичь высоких значений коэффициента полезного действия при условиях как суб-, так и суперкавитации.

Чтобы моделировать кавитационные течения в различных турбулентных моделях, в [19] использовался гидропрофиль NACA2412. Результаты показали, что частоты импульсов давления и циклы утечки, полученные с помощью турбулентной модели крупных вихрей, были близки к экспериментальным значениям. В [20, 21] анализировалось развитие кавитации на поверхности гидрокрыла при больших числах Рейнольдса. В [22] использовали методы изучения влияния течения жидкости около гидрокрыла NACA 0015 и анализа гидродинамических сил на крыле. Непрерывный поток воды на передней кромке гидрокрыла моделировался при различных условиях с помощью коммерческого пакета ANSYS-CFX, который использует SST (переноса сдвиговых напряжений) *k*— ω модель турбулентности. В [23] было выполнено исследование гидродинамичеких характеристик дву- и трехмерных погруженных гидрокрыльев, имеющих различную геометрию, с помощью численного моделирования методами вычислительной гидродинамики. Выбор оптимальных искусственных нейронных сетей (ANN) предсказывает гидродинамичекие характеристики гидрокрыла. Различные углы атаки и скорости набегающего потока жидкости, обтекающей поверхность гидрокрыла, были использованы для значимых критериев вычисления соотношения между выталкивающей силой и силой трения. В [24] была создана двумерная численная модель в рамках компьютерной программы ANSYS Fluent, чтобы моделировать течение морской воды вокруг погруженного гидрокрыла NACA 4412, помещенного ниже поверхности воды. Полученные результаты демонстрируют удовлетворительное согласие с экспериментальными измерениями. В [9] были проведены экспериментальные и численные испытания обтекания жидкостью (водой) цилиндрических опор и вытянутых плоских геометрических тел; обтекание отдельных геометрических тел при разных скоростях и различных углах набегающего потока воды было проанализировано в рамках гидравлической модели. В настоящем исследовании мотивацией и намерениями авторов было дополнительно провести гидравлический анализ для различных расположений гидрокрыла, на которое поток воды набегает при различных углах атаки. Так как гидрокрыло имеет переменные размеры (его ширина уменьшается вдоль тела), было дополнительным мотивом выполнить анализ течения и определить расположение пограничных слоев и точек отрыва вдоль таких тел в индивидуальных тестируемых вариантах.

2. ОБРАЗОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Когда на плоской пластине жидкость течет на некотором небольшом расстоянии *x* от платины, жидкость движется на определенной скорости. Из-за наличия вязкости, вблизи пластины образуется пограничный слой, в котором скорость непрерывно изменяется от v = 0 м/с (непосредственно на пластине) до некоторого максимального значения [10]. В набегающем потоке скорость однородная, и ламинарный пограничный слой формируется в начале плоской гладкой пластины. С ростом числа Рейнольдса Re течение терпит изменения, превращаясь из устойчивого в неустойчивое, т.е. ламинарный пограничный слой сменяется на турбулентный пограничный слой. Значение числа Рейнольдса, при котором происходит смена одного пограничного слоя другим, может быть определено из выражения (2.1) и это $3 \times 10^6 - 4 \times 10^6$ [25]

$$\operatorname{Re} = \frac{v \cdot x}{\mu},\tag{2.1}$$

где v — скорость набегающего потока, x — горизонтальное расстояние, отсчитываемое от передней кромки плоской пластины, и μ — динамический коэффициент вязкости. Зона между ламинарным и турбулентным пограничными слоями называется зоной перехода, она зависит от интенсивности турбулентности в свободном потоке [3]. В области турбулентного пограничного слоя формируется тонкий вязкий подслой. Такой подслой обладает большими градиентами скорости и внутренним трением. При смене ламинарного течения на турбулентное толщина пограничного слоя возрастает. На плоской пластине толщина пограничного слоя δ зависит от расстояния x от передней кромки плоской пластины и режима течения. Если вблизи передней кромки имеет место устойчивое течение, толщина пограничного слоя определяется следующим образом:

$$\delta(x) = \frac{c \cdot x}{(\text{Re})^{1/2}} = \left(\frac{c \cdot x^{1/2}}{v_{\infty}^{1/2}}\right) \cdot \left(\frac{\mu}{\rho^{1/2}}\right),$$
(2.2)

где *с* – некоторая постоянная, ρ – плотность жидкости, $\operatorname{Re}\left(\operatorname{Re}=\frac{\rho V_{\infty}x}{\mu}\right)$ – число Рейнольдса, и

 v_{∞} обозначает скорость набегающего потока. Чем меньше вязкость, т.е. чем больше Re, тем медленнее происходит нарастание пограничного слоя [8]. Благодаря вязкости жидкости, жидкость прилипает к подложке, создавая пограничный слой. Это создает трение на подложке. Трение (касательное напряжение) τ может быть определено из закона сохранения количества движения.

Трение на подложке зависит от плотности жидкости ρ и коэффициента сопротивления c_f , который не является некоторой константой, а зависит от изменения толщины пограничного слоя вдоль подложки [3, 7, 25]

$$\tau = \frac{1}{2}\rho c_f v^2. \tag{2.3}$$

Каждая из частиц испытывает определенное сопротивление во время своего движения в жидкости, которое вызывается теми силами, которые вынужлают эти частины лвигаться. Сопротивление имеет направление, которое противоположно направлению тех сил, которые вынуждают тело (частицу) двигаться. Это зависит от геометрических свойств частицы, скорости, с которой частица движется в жидкости, шероховатости, плотности и вязкости жидкости, в которой частица движется. Число Рейнольдса играет значительную роль в определении величины сопротивления. Пограничный слой влияет на сопротивление трения [7, 10]. Помимо влияния шероховатости, образование пограничного слоя также находится под воздействием градиента давления. Одним из основных эффектов градиента давления является деформация профиля скорости. Толщина пограничного слоя также зависит от соотношения между скоростью U и градиентом давления $\frac{dp}{dx}$. Глядя на течение в плоскости *xy*, в случае конвергентного потока можно видеть, что с увеличением скорости в направлении оси *x* градиент давления становится отрицательным, делая пограничный слой тонким $\left(\frac{dU}{dx} > 0, \frac{dp}{dx} < 0\right)$ [10]. Давление *p* уменьшается при увеличении скорости *U*, тем самым турбулентные вихри не могут оставаться в пограничном слое. В такой ситуации толщина пограничного слоя относительно небольшая. В противоположность ускорению, толщина пограничного слоя возрастает во время торможения. Во время конвергентного течения с торможением давление возрастает и становится положительным [3]. Расширение пограничного слоя является некоторым индикатором того, что имеет место отрыв пограничного слоя $\left(\frac{dU}{dx} < 0, \frac{dp}{dx} > 0\right)$. Во время ускоряющегося течения dp/dx < 0 пограничный слой все еще крепко прижимается к твердой стенке. Уменьшая скорость, т.е. замедляя поток и увеличивая давление, можно расширить пограничный слой до тех пор, что он больше не может примыкать к твердой

стенке. В этот момент пограничный слой отрывается от стенки, создавая вихри. Точка, в которой пограничный слой отрывается от подложки, называется точкой отрыва. Эта точка лежит в области замедления потока dp/dx > 0. В точке отрыва градиент скорости равен нулю dv/dx = 0 [3, 6].

3. ЛАБОРАТОРНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НМ133

В данном исследовании физическое моделирование было выполнено на физической модели (рис. 1). Физическая модель HM133 использовалась для визуализации полей течения, т.е. для наблюдения за процессами, происходящими в ламинарных и турбулентных потоках в прямоугольном канале. Эта модель генерирует мелкие пузырьки газа (используя пару анод—катод), что позволяет визуализировать течение. В физическую модель помещают различные физические трехмерные геометрические тела, на которых с помощью пузырьков анализируются обтекание этих тел, образование пограничного слоя и расположение точек отрыва вихрей [8, 26].

3.1. Описание работы на физической модели НМ133

Физическая модель HM133 представляет собой установку, которая использует электричество для запуска насоса (циркуляция воды) и в качестве регулятора тока (для генерирования пузырьков). Она состоит из полистиролового бака размером 900 × 300 × 220 мм, в котором циркулирует жидкость (рис. 2). Внутри бака имеются два отдельных отсека: входной отсек (сверху) и выходной отсек (снизу). Течение жидкости начинается во входном отсеке. Вначале стеклянные шарики, предназначенные для стабилизации течения, помещают во входной отсек (в специальное, предназначенное для этого место на дне отсека), где их равномерно распределяют. Шарики предназначенное для стабилизации возможного волнообразного течения непосредственно в самом начале фунционирования рабочего сечения. Бак заполняют максимально шестью литрами воды до тех пор, пока входная и выходная секции не заполняются приблизительно на 2 см ниже верхнего края. Маленькая пластина, стабилизирующая поток, располагается вертикально, так что может развиться стационарное равномерное течение (рис. 2 и 3). Непрерывная циркуляция



Рис. 1. Проведение экспериментов на физической модели НМ133 (Фото: Э. Жиц).



Рис. 2. Компоновочный план физической модели НМ133 (обозначения на рисунке даны в тексте статьи) [8].



Рис. 3. Вид сбоку физической модели НМ133 [10].

жидкости реализуется с помощью насоса, расположенного этажом ниже бака, и расход жидкости может быть легко настроен за счет регулирования скорости жидкости в насосе. Интенсивность образования пузырьков могла быть задана регулятором, так же как задаются интервалы формирования пауз в процессе генерирования пузырьков. В данной работе рассматривается постоянное производство пузырьков без пауз [26].

На рис. 2 на компоновочном плане число 12 обозначает полистироловый бак, в котором происходит течение. Стеклянные шарики правильно расположены на входе в секцию (метка 1). Номер 2 обозначает пластину для стабилизации течения. Электролиз состоит из пластины из нержавеющей стали (цифры 3 и 4), помещенной в воду, т.е. анод и катод, представленные цифрой 5.

ŽIC и др.

Электролиз производит пузырьки водорода (6), которые хорошо видны в ярком свете (7). Объект исследования, обозначенный цифрой 8, обычно расположен в середине сечения измерений. Метка 9 показывает окна и 10 — светодиоды. Гребеночный барьер (11) служит для регулировки уровня воды.

После того как физическая модель была приведена в рабочее положение, нужно выполнить следующие действия на контроллере: 1. Включить белый свет (кнопка "*Ocseщenue*"); 2. Включить насос ("*Hacoc*"); 3. Включить генератор пузырьков; 4. Задать подходящий расход воды (скорость); 5. Задать нужную величину производства пузырьков ("*Peryляmop moka*"); 6. Задать длительность импульса производства пузырьков ("*Импульс*"); 7. Задать длительность паузы между импульсами ("*Пауза*").

Модель работает на основе электролиза. Электролиз производит пузырьки на платиновой проволочке (катод), что улучшает визуализацию течения. Два электрода погружены в воду и электрический ток, т.е. электроны текут между электродами. Пластина из нержавеющей стали служит анодом, и тонкая платиновая проволока служит катодом. Чем ближе катод к аноду, тем больше пузырьков водорода образуется на проволоке (рис. 2 и 3). Усиление электрического тока на регуляторе результируется в большем числе образующихся пузырьков. Центр измерительного сечения освещался сбоку белым светом, испускаемым светодиодами. Измерительная часть имела размер 560 × 150 × 176 мм. Чтобы видеть лучше образующиеся пузырьки, к жидкости была добавлена глауберова соль (декагидрат сульфата натрия $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$), которая оставляет белый налет на стенках выходного бака. Поскольку процесс электролиза результируется в почти полном отсутствии образования пузырьков при использовании дистиллированной воды, к воде нужно добавить 7 г глауберовой соли, что ускоряет образование пузырьков [26].

3.2. Эксперименты, выполненные на физической модели НМ133

Эксперименты на физической модели HM133 выполнялись для геометрического тела в виде симметричного гидрокрыла таким образом, что одно и то же геометрическое тело устанавливалось под различными углами к направлению течения, чтобы получить наилучшее возможное представление о жидкости, обтекающей данное тело. Первая подмодель гидрокрыла (Подмодель 1) была размещена в направлении потока (рис. 4а), вследствие чего были отмечены очень слабые потоки воды около стенок тела. Никаких значительных вихревых явлений на модели не наблюдалось, поскольку гидрокрыло было спрофилировано так, чтобы оно было хорошо закруглено в передней части и постепенно плавно сужалось к концевой части. Для жидких частиц, которые достигли поверхности объекта, такая форма затрудняла оставление этой поверхности, поэтому значительные вихри отсутствовали. Это имело эффект снижения гидродинамического сопротивления. Кроме того, в этой подмодели труднее наблюдать отрыв пограничного слоя, поскольку точка отрыва практически отсутствует.

Вторая подмодель (Подмодель 2) представляет собой гидрокрыло, установленое под углом 45° к направлению потока (рис. 46). В противоположность первой подмодели, на этой подмодели можно более отчетливо наблюдать, что турбулентность зарождается на передней, хорошо закругленной части. Таким образом, появление вихря за закругленной частью наблюдалось более отчетливо. В этой точке образуется точка отрыва, т.е. пограничный слой отрывается. Поток жидкости, который достигает остальной части стенок гидрокрыла, будучи наклонным, свободно скользит вдоль стенки в формально ламинарном течении при меньших скоростях (значительных вихрей не наблюдалось).

Третья подмодель гидрокрыла (Подмодель 3) установлена под углом 30° к направлению потока. В этом примере тело гидрокрыла находится под меньшим углом и имеет бо́льшую турбулентность на заднем сужении. Турбулентность более ярко выражена по сравнению с предыдущим примером субмодели 2 (рис. 4в).

На последней подмодели (Подмодель 4) гидрокрыло установлено под углом 90°, перпендикулярно направлению потока воды (рис. 4г). Из-за неблагоприятного положения гидрокрыла турбулентность возникает мгновенно при запуске потока воды. Турбулентность возникает как за закругленной частью тела, так и за суженной частью крыла, но она сильнее в этой точке. Вдоль стенки пузырьки воздуха замедляются и ускоряются, когда они приближаются к суженой части, что также наблюдалось в случае более интенсивных вихрей (маленькие полистироловые шарики, введенные в поток воды, также были использованы для визуализации течения). Пограничный слой отрывался по обе стороны гидрокрыла.



Рис. 4. Обтекание гидрокрыла водой под разными углами атаки, а) подмодель 1, б) подмодель 2, в) подмодель 3, г) подмодель 4.

4. ОПИСАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

ANSYS Fluent представляет собой компьютерную программу, используемую для численного моделирования динамики жидкости и является одним из инструментов в рамках пакета прикладных программ ANSYS Workbench. В настоящей работе использовалась коммерческая программа ANSYS Fluent 2020R1, которая идеально подходит для анализа обтекания дву- и трехмерных геометрических тел [1, 2, 4, 8]. Среди других возможных приложений ANSYS Fluent может быть использована для решения задач в области реологии, многофазных течений, распространения потоков в открытых каналах, обтекания жидкостью и газом твердых и подвижных стенок, магнитных явлений, моделирования электрических токов, аэродинамики, энергетики, термодинамики и подобных явлений [1, 7]. Технология численного моделирования ANSYS предлагает возможность получения улучшенных расчетных характеристик для инженеров и в различных отраслях промышленности.

Создание какой-либо численной модели в рамках компьютерной программы ANSYS Fluent 2020R1 включает в себя три основных процесса: 1) предварительная обработка данных; 2) решение данной задачи; 3) обработка выходных данных. Предварительная обработка данных включает в себя определение геометрии в численной модели и генерирование расчетной сетки. Первый шаг состоит в определении геометрии модели и второй шаг — в определении численной сетки. Для настоящей работы в рамках компьютерной программы ANSYS Fluent использовалась программа DesignModeler [1, 2, 8]. Эта программа содержит инструменты для сложной геометрии, генерирования сеток и инструменты оптимизации численных сеток, чтобы удовлетворить требованиям для выполнения усложненного гидродинамического анализа. Геометрия может быть введена из различных графических программ, такиз как Автокад. Далее, результирующие структурированные или неструктурированные сетки, топологии и граничные условия запасаются в базе данных, откуда они могут быть легко конвертированы во входные файлы, необходимые для получения частного решения численной модели [2, 7].

После создания геометрии какого-нибудь одного объекта необходимо создать сетку. Программа DesignModeler предлагает несколько сеточные модули: тетраэдрическая сетка, шестигранная сетка, гибридная сетка и сеточный модуль Shell Meshing, который обеспечивает более быструю генерацию сеток на двух- и трехмерных поверхностях. Для геометрического тела гидрокрыла задается программно-управляемая дифракция (в области вокруг самого гидрокрыла численная сетка имеет некоторую специальную форму и сильнее сгущена на концах для получения более точных результатов). При генерировании сетки область нахождения решения задачи дис-

ŽIС и др.



Рис. 5. Дискретизация численной сети для модели гидрокрыла при угле 45° по отношению к направлению потока воды.

кретизируется с помощью узлов, связанных в форме конечных элементов, которые совместно образуют объем области решения. Каждой поверхности присваивается доменное имя, на основе которого позже определяются начальные и граничные условия в численной модели. Пользователь должен быть готов создать структурированную и/или неструктурированную сеть, которая способна обеспечить результаты с достаточной точностью [1, 2, 5, 7]. Общее число узлов и элементов, которые дискретизируют численную сетку, равнялось 5538 и 5152 в модели гидрокрыла (модель гидрокрыла при 45°, рис. 5). Создание численной сетки является одним из наиболее важных шагов, чтобы добиться более четкого представления о процессе формирования пограничного слоя. Для генерации сетки в области течения использовались треугольные и квадратные конечные элементы.

Центральная часть в создании некоторой численной модели включает в себя определение свойств этой численной модели, таких как тип модели турбулентности, начальные и граничные условия, тип жидкости, итерационные методы и определение точности сходимости решения. Решение данной проблемы включает в себя нахождение решений уравнений в частных производных (уравнений неразрывности, уравнений сохранения количества движения и кинетической энергии) и решений для численной модели. В настоящей работе k— ϵ -модель турбулентности с двумя характеристическими уравнениями используется для решения задачи турбулентности с использованием стандартной пристеночной функции.

Обозначение k используется для турбулентной кинетической энергии, которая содержит информацию о том, сколько энергии несут в себе пульсации. Чем больше интенсивность пульсаций, тем больше кинетическа энергия. Коэффициент ε описывает диссипацию турбулентной кинетической энергии. Он содержит информацию о скорости диссипации кинетической энергии. Для практических целей использутся стандартная k— ε -модель турбулентности. Эта модель использует два следующих уравнения для k and ε [2, 8], первое из которых

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mathbf{v}_t}{\mathbf{\sigma}_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P - \varepsilon, \tag{4.1}$$

где $\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mathbf{v}_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)$ – диффузионный перенос, P – скорость производства энергии, ε и \mathbf{v}_t – турбу-

лентная вязкость. Левая часть уравнения представляет собой общее изменение турбулентной кинетической энергии. Второе уравнение относится к изменению є и выражается как

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial\varepsilon}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{p\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k},$$
(4.2)

в котором $\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mathbf{v}_t}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right)$ есть диффузионный перенос, $C_{\varepsilon 1} \frac{p\varepsilon}{k}$ представляет собой скорость произ-

водства энергии и $C_{\epsilon^2} \frac{\epsilon^2}{k}$ – скорость диссипации. На основе опыта ученых, изучавших обтекание гидрокрыла [14–16, 19], 5%-ная интенсивность турбулентности выбиралась, чтобы определить турбулентность в модели, тогда как величина отношения толщины слоя, в котором имеет место

турбулентная вязкость, к толщине пограничного слоя было взято порядка 10. Следует отметить, что в набегающем потоке доминирует турбулентная вязкость, которая не является физическим свойством жидкостей (подобно молекулярной вязкости), но является следствием интенсивности смешения вихрей в частице [5, 6]. Молекулярная вязкость преобладает в непосредственной окрестности неподвижной стенки, тогда как увеличение расстояния от стенки приводит к эффекту доминирования турбулентной вязкости. Пограничный слой разделяется на внутренний и внешний слои, тогда как внутренний слой может быть далее разделен на три подслоя: вязкий, переходный и инерциальный слои [6]. Из-за бо́льших градиентов вдоль твердой стенки по сравнению со свободным потоком необходимо произвести пространственную дискретизацию вдоль кромок, чтобы в конечном итоге хорошо описать физический процесс. Приближение к стенке уменьшает влияние турбулентной вязкости, что является трудной и интересной задачей для выбора самой модели турбулентности. Такие задачи могут быть решены двумя способами. В первом методе диапазон вязкого и инерционного подслоев описывается пристеночными функциями с применением модели турбулентности в инерциальном подслое, тогда как во втором методе сушествующая модель турбулентности модифицируется так, чтобы она асимптотически приближала стенку (что зачастую требует тонкой дискретизации вблизи стенки).

В настоящей работе обтекание тела происходит в присутствии воды и в качестве вещества тела был выбран пластик (плексиглас). Скорости потока величиной 0.5 м/с были заданы в качестве начальных условий на подмоделях. Граничное условие на выходе из канала задается в виде давления на выходе со средним опорным давлением (измерение), равным 0 Па. Левая и правая боковые стенки канала и стенки геометрических тел неподвижны, т.е. скорость потока на поверхностях стенок равна нулю. Для пространственной дискретизации производных использовались схемы против потока первого и второго порядка. На основе этих схем вычислялись турбулентная кинетическая энергия, скорость диссипации турбулентности, градиент, давление и напряжения Рейнольдса. Для решения уравнений Навье—Стокса использовался алгоритм SIMPLE (полунеявный метод для уравнений, связанных по давлению) [1, 2, 7]. Значения допусков в условиях сходимости для отдельных переменных (непрерывность, скорости по осям x и y, k и ε) были взяты равными 0.0001. Число шагов итераций выбиралось в пределах 1000. Для приведения в исходное положение использовалась стандарная инициализация, поскольку это требует от пользователя ввести каждое значение, чтобы задать подходящее окружение и увеличить реальность описания физического процесса.

Постпроцессорная обработка включала в себя анализ и обработку данных (отдельные физические величины), которые могут быть представлены в векторном (через векторные поля) и контурно-графическом представлениях. В этом случае вихревые явления, вызванные сильной турбулентностью за наблюдаемым геометрическим телом, становятся более наглядными. Постпроцессинг вычислительной гидродинамики предлагает возможность отобразить изменения одной физической величины через серию линий тока. Это задает начальную поверхность или плоскость, из которой линии тока начинают истекать. Кроме того, линии тока могут быть размещены более часто или менее часто в зависимости от искомой четкости представления течения. Помимо графических представлений, полученные результаты могут быть изображены посредством численного моделирования, в котором жидкие частицы движутся в пространстве и времени. При моделировании скорость частиц может быть задана большей или меньшей, в зависимости от того, как накапливается видеоинформация или уменьшается видеопамять.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из-за необходимости сравнивать отдельные физические величины, измеренные на физической модели HM133, в данной работе была также проведена разработка численных моделей с компьютерной программой ANSYS Fluent 2020R1. Результаты гидродинамического анализа изображены графически с помощью контурных и векторных представлений с соответствующей подписью на дисплейной странице. Предполагалось, что для модели гидрокрыла исходная скорость, на основе которой был проведен гидродинамический анализ на физических моделях, составляла 0.5 м/с. Измерения скорости в отдельных критических точках в пределах рабочей части физической модели (рис. 4) проводились с помощью классической трубки Пито с использованием формулы Торичелли $v = \sqrt{2gh}$ [25] и окончательная проверка полученных значений проводилась на численных моделях для потока воды около отдельных исследованных геометрических тел (табл. 1). Дополнительная проверка расчетов выполнялась с помощью маленьких полистироловых шариков пренебрежимо малой массы, стекающих по потоку воды.

Субмодель 1 – гидрокрыло (в направлении потока воды, 0°)			
Точки измерения	Высота в трубке Пито, <i>h</i> [мм]	Физическая модель, v [м/с]	Численная модель, <i>v</i> [м/с]
1	14.0	0.52	0.55
2	13.0	0.51	0.53
3	16.0	0.56	0.58
4	19.0	0.61	0.56
Субмодель 4 — гидрокрыло (под углом 90°, перпендикулярно направлению потока)			
Точки измерения	Высота в трубке Пито, <i>h</i> [мм]	Физическая модель,	Численная модель,
		V [M/C]	v [M/C]
1	23.0	0.67	0.72
2	18.0	0.59	0.63
3	42.0	0.91	0.87
4	65.0	1.13	1.21

Таблица 1. Верификация скорости течения на физических (измеренные значения) и численных (вычисленные значения) моделях гидрокрыла

Для создания двумерной модели гидрокрыла была выбрана стандартная версия k— ϵ -модели турбулентности. Скорость течения, при которой был выполнен анализ, составляла 0.5 м/с (скорость, измеренная на физической модели HM133. Были проанализированы следующие четыре подмодели:

- 1) гидрокрыло, установленное по направлению потока (рис. 6а);
- 2) гидрокрыло, установленное под углом 45° к направлению потока (рис. 6б);
- 3) гидрокрыло под углом 30° к направлению потока (рис. 6в);

4) гидрокрыло, установленное перпендикулярно направлению потока (рис. 6г).



Рис. 6. Векторный вид турбулентного (вихревого) поля вязкости для численной модели гидрокрыла; а) подмодель 1, б) подмодель 2, в) подмодель 3, г) подмодель 4.



Рис. 7. Векторный вид поля скоростей для численной модели гидрокрыла; а) подмодель 1, б) подмодель 2, в) подмодель 3, г) подмодель 4.

На рис. 6 векторное представление турбулентной вязкости дано в сравнении для четырех использованных численных подмоделей. Направление турбулентной вязкости представлено векторами, показывающими образование вихрей за телом. Наибольшая интенсивность турбулентной вязкости была зафиксирована на частной модели третьей конфигурации гидрокрыла, установленного под углом 30° к направлению потока на более узкой (задней) части модели (рис. 6в). В силу оптимального положения гидрокрыла, установленного по направлению потока, в этом случае не было значительного вихреобразования, тогда как гидрокрыло, установленное перпендикулярно направлению потока, увеличивало турбулентную вязкость только на определенном расстоянии от обтекаемого тела.

На рис. 7 изображено изменение вектора скорости в сравнении для четырех рассмотренных численных подмоделей. В случае симметрично установленного гидрокрыла кинетическая энер-



Рис. 8. Контурный вид поля давления для численной модели гидрокрыла; а) подмодель 1, б) подмодель 2, в) подмодель 3, г) подмодель 4.

гия, как результат увеличения скорости, максимальна на каждой стороне гидрокрыла. В случае наклонно установленных тел наибольшее изменение скорости потока наблюдается вдоль пиков, т.е. на передней закругленной и задней суженной частей тела. Как показано на субмодели 3 (рис. 7в), когда гидрокрыло было установлено под углом 30° , на этих пиках развивается турбулентность и значительно возрастает скорость. Векторы скорости описывают появление вихрей за гидрокрыльями в подмоделях 2, 3 и 4 (рис. 76-7r).

Помимо векторных представлений, наблюдамые физические величины были даны в контурном виде (рис. 8). В случае субмодели 1 (рис. 8а) повышенное давление генерируется только на передней закругленной части, где оно достигает наибольших значений. При помещении обтекаемого тела под углом 45° давление прикладывается к большей части поверхности, где есть прямой контакт с частицами натекающей жидкости. Интересно отметить, что самое низкое давление достигается на суженной части сзади. Иллюстрация подмодели 3 (рис. 8в) подобна иллюстрации подмодели 2 (рис. 8б) за исключением того, что избыточное давление имеет место на небольшой части контактной поверхности на закругленной стороне. Наиболее неблагоприятное положение по отношению к давлению возникает в части подмодели 4, поскольку давление действует полностью вдоль всей контактной поверхности (рис. 8г).

выводы

Темой настоящего исследования был анализ гидродинамики обтекания водой геометрического тела в виде симметричного гидрокрыла. Для некоторого гидрокрыла заданной формы было разработано несколько подмоделей, базирующихся на угле наклона гидрокрыла по отношению к направлению потока воды. Обтекание гидрокрыла водой было изучено для чисел Рейнольдса в диапазоне от 2100 до 14600. Основное внимание было сосредоточено на наблюдении закономерностей и свойств потока воды при изменении положения гидрокрыла. Также были исследованы образование пограничного слоя и развитие точек отрыва, в которых пограничный слой отделяется от поверхности. Для проверки и верификации результатов экспериментального исследования был проведен анализ гидродинамики течения посредством численного моделирования с помощью компьютерной программы ANSYS Fluent 2020R1. Численные модели обеспечивали более точные решения по сравнению с лабораторными исследованиями. Для создания численных моделей использовалась стандартная k- ϵ модель турбулентности. Небольшие отклонения отдельных физических величин, которые были определены на основе результатов численного моделирования и лабораторных экспериментов, главным образом савязаны с размерами численной сетки. Рассматривая картины течения, полученные экспериментально на физической модели, и представления графических контуров, найденные из численных моделей, можно сделать вывод, что точки сдвига вихрей находятся почти в одних и тех же положениях по отношению к геометрическому телу гидрокрыла. Вихревые поля, которые имеют место при определенных углах наклона гидрокрыла по отношению к скорости течения, также находятся в хорошем согласии в физических и численных моделях.

Вдобавок к существующим геометрическим телам, которые были получены в пакете с физической моделью HM133, для создания различных форм, интересных для дальнейших исследований и тестирования, можно использовать 3D принтер из Гидротехнической лаборатории Факультета строительства гражданских сооружений Университета Риеки. В соответствии с этим имеется возможность изучить некоторую комбинацию (набор) различных геометрических тел и увидеть закономерности их обтекания. Также возможно проанализировать изменения в течении жидкости для одного и того же геометрического тела и положения за счет постепенного увеличения скоростей. Все это регулируется контроллером, который является составной частью физической модели HM133. Безусловно, было бы желательно провести такое же исследование, выбирая различные модели турбулентности в рамках компьютерной программы ANSYS Fluent.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данное исследование является результатом проекта Развитие научно-исследовательской инфраструктуры университетского городка в Риеке (RC.2.2.06-0001), софинансируемого Европейским Фондом регионального развития (ERDF) и Министерством науки и образования Республики Хорватия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Žic E. Introduction to computational fluid dynamics analysis // In Proceedings of the 3rd Summer School of Computational Fluid Dynamics (CFD). CFD materials from lectures, Bikić S. and Bukurov M. (Eds.), Novi Sad: Faculty of Technical Sciences in Novi Sad, 5–10 July 2019.
- 2. ANSYS Fluent 18.0 tutorials. Work manual, Southpointe, Canonsburg: ANSYS, Inc., 2017.
- 3. *Jović V.* Fundamentals of hydraulic engineering. Split: Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split, Element, 2006.
- 4. ANSYS corporate overview. Work manual, Southpointe, Canonsburg: ANSYS, Inc., 2016. *Džijan I.* Computational fluid dynamics. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 2010.

https://www.fsb.unizg.hr/hydro/web_pdf/Racunalna_dinamika_fluida/RDF_Predavanje_2010_2011.pdf

5. *Džijan I*. Computational Fluid Dynamics, Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 2010.

https://www.fsb.unizg.hr/hydro/web_pdf/Racunalna_dinamika_fluida/ RDF_Predavanje_2010_2011.pdf

- 6. *Bukurov M., Žic E.* Fluid mechanics theoretical fundamentals. Handbook on the Course Hydromechanics, Rijeka: Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka, 2017.
- 7. *Jiyuan T., Guan-Heng Y., Chaoqun L.* Computational fluid dynamics a practical approach. Third Ed., Elsevier Ltd., 2018.
- 8. *Černeka P.* Hydrodynamic analysis of fluid flow around various geometric bodies. Final thesis, Rijeka: Faculty of Civil Engineering Rijeka, University of Rijeka, 2019.
- 9. Žic E., Černeka P., Biluš I. Hydrodynamic analysis of fluid obstruction around different geometric bodies // International Journal for Engineering Modelling. 2020. V. 33. № 1–2. P. 59–77. https://doi.org/10.31534/engmod.2020.1-2.ri.05m
- Pamić M., Žic E., Biluš I., Lešnik L. Physical model of forming the boundary layer // Proceedings of the Faculty of Civil Engineering. University of Rijeka. 2018. V. 20. P. 43–58. https://doi.org/10.32762/zr.20.1.3
- 11. Ausoni P. Turbulent vortex shedding from a blunt trailing edge hydrofoil. Ph.D. thesis, Lausanne: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2009.
- 12. *Reisman G.E., Wang Y.C., Brennen C.E.* Observations of shock waves in cloud cavitation // Journal of Fluid Mechanics. 1998. V. 355. P. 255–283.

ŽIC и др.

- 13. Arndt R.E., Song C.C.S., Kjeldsen M., He J., Keller A. Instability of partial cavitation: a numerical/experimental approach // In Proceedings of the 23th Symposium on Naval Hydrodynamics. Val de Reuil, France, 17–22 September 2000.
- 14. *Kouh J.S., Lin T.J., Chau S.W.* Performance analysis of twodimensional hydrofoil under free surface // Journal of National Taiwan University. 2002. V. 86. P. 113–123.
- 15. *Chen C.K., Liu H.* A submerged vortex lattice method for calculation of the flow around three-dimensional hydrofoil // Journal of Ship Mechanics. 2005. V. 9. № 2. P. 156–163.
- Xie N., Vassalos V. Performance analysis of 3D hydrofoil under free surface // Ocean Engineering. 2007. V. 34. P. 1257–1264.
- https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.05.008
- 17. *Kinzel M.P., Lindau J.W., Kunz R.F.* Free-surface proximity effects in developed and super-cavitation // In Proceedings of the 2008 DoD HPCMP Users Group Conference. Seattle: WA, USA, 14–17 July 2008. P. 25–34.
- Brizzolara S., Bonfiglio L. Comparative CFD investigation on the performance of a new family of super-cavitating hydrofoils // Journal of Physics. Conference Series 656. 9th International Symposium on Cavitation (CAV2015). IOP Publishing. 2015. P. 1–5. https://doi.org/10.1088/1742-6596/656/1/012147
- Sedlar M., Ji B., Kratky T., Rebok B., Huzlik R. Numerical and experimental investigation of three-dimensional cavitating flow around the straight NACA2412 hydrofoil // Ocean Eng. 2016. V. 123. P. 357–382.
- 20. Prothin S., Billard J.Y., Djeridi H. Image processing using proper orthogonal and dynamic mode decompositions for the study of cavitation developing on a NACA0015 foil // Experiments in Fluids. 2016. V. 57. № 157. P. 1–25.
- Liu M., Tan L., Cao S. Dynamic mode decomposition of cavitating flow around ALE 15 hydrofoil // Renewable Energy. 2019. V. 139. P. 214–227.
- Ghadimi P., Tanha A., Kourabbasloo N.N., Tavakoli S. Effects of boundary layer control method on hydrodynamic characteristics and tip vortex creation of a hydrofoil // Polish Maritime Research. 2017. V. 24. № 2(94). P. 27–39.

https://doi.org/10.1515/pomr-2017-0047

- Nowruzi H., Ghassemi H., Ghiasi M. Performance predicting of 2D and 3D submerged hydrofoils using CFD and ANNs // Journal of Marine Science and Technology. 2017. V. 22. P. 710–733. https://doi.org/10.1007/s00773-017-0443-0
- Hoquea A., Karimb M., Rahmanc A. Simulation of water wave generated by shallowly submerged asymmetric hydrofoil // 10th International Conference on Marine Technology. MARTEC 2016. Procedia Engineering. 2017. V. 194. P. 38–43.
- 25. Žic E., Ožanić N., Karleuša B. Fluid mechanics theoretical foundations with solved tasks. Work manual from the Course Hydromechanics, Rijeka: Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka, 2012.
- 26. Visualisation of flow fields. Manual for working with the physical model HM133, Hamburg: Gunt Ltd., 2011.

Перевод с англ. Е.А. Пушкаря

Hydrodynamic Analysis of the Fluid Flow around a Symmetric Hydrofoil

E. Žic^{*a*,*}, P. Černeka^{*a*,**}, and I. Biluš^{*b*,***}

^a University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering, Rijeka, Croatia ^b University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Slovenia *E-mail: elvis.zic@uniri.hr **E-mail: petra.cerneka@student.uniri.hr ***E-mail: ignacijo.bilus@um.si

The aim of this paper is to perform a hydrodynamic analysis of the fluid flow around a symmetrical 3D hydrofoil on the physical laboratory model HM133 and to show the formation of the boundary layer and the separation point on the observed body. The analysis is performed in such a way that the geometric body within the measuring section of the physical model HM133 rotates around its vertical axis due to the fluid flow (water), resulting in a various potential view in front of and behind the observed body. The investigations were carried out in Hydrotechnical Laboratory Practicum at the Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka. The paper covers the field of real fluid dynamics, which includes a description of laminar and turbulent flow on a plane surface and the formation of a boundary layer and separation point on the observed geometric body. In this segment, both the boundary layer and its properties have been analyzed in detail. The hydrodynamic analyses based on the tested submodels of hydrofoil of the physical model HM133 were validated and verified with the Computational Fluid Dynamics (CFD). This is based on the development of commercial numerical models in the computer program ANSYS Fluent 2020R1.

Keywords: hydrofoil, physical model HM133, numerical modeling, boundary layer, separation point, ANSYS Fluent 2020R1