

УДК 629.12

В.В.Купреев¹, А.Л.Сухоруков¹, В.А.Чернецов¹

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАВУЧЕГО ЗАТВОРА ПРИ ПОСАДКЕ НА ПОРОГ

В работе методом математического моделирования исследовано движение плавучей створки батопорта, которая перекрывает судопропускной канал за счет заполнения водой балластных цистерн. Для моделирования течения вязкой жидкости использован программный комплекс STAR-CD (разработчик Computational Dynamic, London). Проведен сопоставительный анализ движения батопорта с исходной формой поперечного сечения створки и створки с дополнительным конструктивным элементом (объемом плавучести), который изменяет структуру потока при приближении объекта ко дну и играет роль разрушителя крупномасштабных вихревых структур. Показано, что при определенном перепаде уровней жидкости (пороге устойчивости) начинаются незатухающие колебания створки. При этом значение порога устойчивости доработанной конструкции оказывается значительно выше. Представленные результаты позволяют определить пути увеличения порога устойчивости сооружения.

Двухстворчатый плавучий затвор с сегментными батопортами, входящий в состав судопропускного сооружения С-1 комплекса защитных сооружений Петербурга от наводнений, предназначен для перекрытия, при возникновении угрозы наводнения, судоходного канала шириной 200 м. Входящие в состав створок плавучего затвора сегментные батопорты, после их вывода в рабочее положение, должны быть погружены по заданному пространственно-временному закону на порог и находиться в этом положении в устойчивом состоянии, перекрывая собой судопропускной канал С-1 (рис. 1).

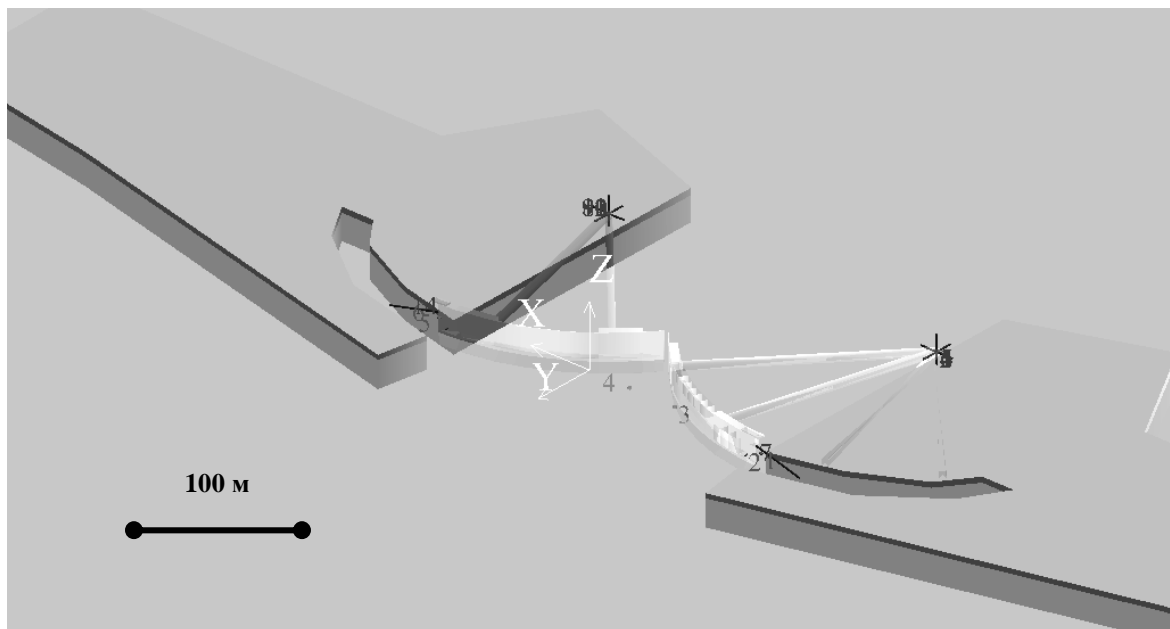


Рис. 1. Общий вид плавучего затвора

¹ Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин» (Санкт-Петербург)
© В.В.Купреев, А.Л.Сухоруков, В.А.Чернецов, 2008

Посадка батопорта на порог должна осуществляться путем заполнения водой балластных цистерн, а всплытие - с помощью удаления воды из них. Батопорты должны принимать на себя все внешние воздействия, возникающие при наводнении, и передавать их через опорные рамы на шаровые опоры, крепящиеся на устоях.

В ходе проведенных ранее модельных экспериментов было установлено, что при посадке батопортов на порог могут возникать автоколебания. При некоторых условиях подобные автоколебания могут привести к разрушению затвора. Ведущую роль в возникновении автоколебаний играют гидродинамические силы, то есть силы, действующие на батопорт со стороны движущейся жидкости. В связи с этим возникла необходимость детального исследования обтекания затвора при его посадке на порог при разных значениях перепада уровня воды с обеих сторон дамбы. Очевидно, что основное силовое гидродинамическое воздействие на батопорт обусловлено потоком жидкости, возникающим вследствие этого перепада, это позволяет использовать двумерную расчетную схему и рассматривать плоское сечение створки батопорта.

Постановка задачи в программном комплексе STAR-CD. При моделировании течения вязкой жидкости с помощью программного комплекса STAR-CD рассматривалась расчетная область, представленная на рис. 2.

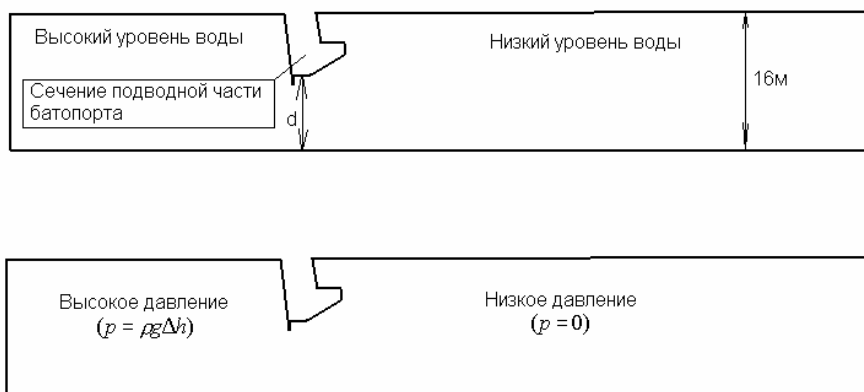


Рис. 2. Расчетная область

Следует отметить, что разность уровней слева и справа от батопорта моделировалась путем задания соответствующего перепада давлений $p = \rho g \Delta h$. Здесь Δh – перепад уровней слева и справа от батопорта; p – соответствующий ему перепад давлений; ρ –

плотность воды, g – ускорение свободного падения. Расчет проводился в терминах избыточного давления по отношению к атмосферному, которое задавалось на правой верхней границе расчетной области. Размеры расчетной области задавались следующим образом: общая длина расчетной области $l = 125$ м; расстояние от левого края расчетной области до сечения батопорта 50 м; высота расчетной области (соответствующая глубине канала в зоне низкого уровня воды) $h = 16$ м; расстояние от нижней горизонтальной поверхности батопорта до порога являлось переменной величиной. Очевидно, что при численном решении задачи необходима деформируемая вычислительная сетка. На рис. 3 представлены два положения батопорта, соответствующие различным расстояниям до порога.

Для корректной работы вычислительного алгоритма необходимо взаимоднозначное соответствие узлов вычислительной сетки при различных положениях батопорта. В связи с этим, была разработана методика пересчета узлов деформируемой вычислительной сетки как функций параметра, определяющего положение объекта на основе полиномов Лагранжа. В результате работы этой вычислительной процедуры, координаты узлов расчетной сетки в любом положении объекта могут быть определены.

В расчете не моделировалась свободная поверхность жидкости, а условия на ней заменялись стенкой со скольжением.

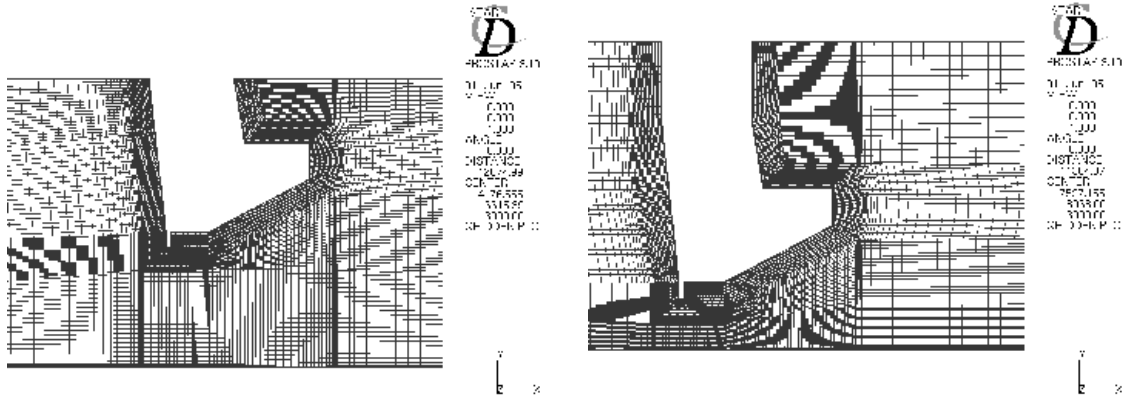


Рис. 3. Деформируемая вычислительная сетка

Расчет нестационарного поля течения жидкости проводился в программном комплексе STAR-CD. Базовые вычислительные процедуры комплекса основаны на численном решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу методом контрольных объемов. Исходная система уравнений Навье-Стокса, описывающая нестационарный двумерный поток вязкой несжимаемой жидкости, в отсутствии массовых сил в декартовой системе координат имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} \right) \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2^2} \right), \\ \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = 0 \end{cases}$$

где u_1, u_2 – компоненты вектора скорости потока; μ – динамическая вязкость; ρ – плотность; p – давление.

К данной системе применяется процедура осреднения, при этом исходные переменные представляются в виде суммы осредненной составляющей и малой пульсационной составляющей ($u_1 = \bar{u}_1 + u'_1$; $u_2 = \bar{u}_2 + u'_2$; $p = \bar{p} + p'$) в результате чего будем иметь (черта над осредненными составляющими не указана):

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0; \quad \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

В соотношениях (1) предполагается суммирование по повторяющемуся индексу j .

Здесь: $\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j}$ - компоненты тензора напряжений; $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

- компоненты тензора осредненных скоростей деформаций.

В соотношениях для компонент тензора напряжений появляются члены, зависящие только от пульсационных составляющих (так называемые напряжения Рейнольдса), и система уравнений (1) оказывается математически незамкнутой. Для ее замыкания вводится понятие турбулентной вязкости μ_t как коэффициент пропорциональности между компонентами тензора напряжений Рейнольдса и компонентами тензора осредненных скоростей деформаций:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \delta_{ij}.$$

В используемой в задаче $k - \epsilon$ модели турбулентности турбулентная вязкость μ_t является функцией кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ϵ :

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon}.$$

В свою очередь параметры k и ϵ находятся из решения соответствующих уравнений переноса на основе осредненных составляющих течения в каждой конкретной точке потока:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \mu_t S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i};$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \epsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left[\mu_t S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + C_{\epsilon 4} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i}.$$

Для лучшего учета эффектов анизотропии в турбулентных потоках в программном комплексе STAR-CD имеется нелинейная квадратичная $k - \epsilon$ модель турбулентности, в которой используются нелинейные соотношения, связывающие компоненты тензора рейнольдсовых напряжений и компоненты тензора осредненных скоростей деформаций.

В пристеночных областях, где вязкие и турбулентные напряжения имеют одинаковый порядок, используется аппарат пристеночных функций. Суть пристеночных функций заключается в использовании известных аналитических распределений параметров турбулентного пограничного слоя и последующей сшивке решений с областью потока, где порядок турбулентных напряжений существенно выше вязких. Внешняя граница аналитических распределений задает размеры пристеночных ячеек.

При проведении расчета динамики батопорта решалась сопряженная задача. При этом на каждом шаге интегрирования по времени определялось поле течения, распределение давлений и, тем самым, значения нестационарных гидродинамических сил, действующих на объект. Под действием этих сил батопорт изменяет свое положение в пространстве. Для определения нового положения решалось соответствующее уравнение движения объекта. Затем для нового положения батопорта осуществлялось перестроение вычислительной сетки и вновь рассчитывалось поле течения.

Уравнения движения батопорта в вертикальной плоскости выводились на основе следующих соображений. Рассмотрим плавучий объект, находящийся в состоянии равновесия, на который действуют сила тяжести, сила плавучести и гидродинамическая сила, обусловленная течением жидкости (рис. 4). Спроектируем эти силы на вертикальную ось y и запишем уравнение равновесия:

$$mg = \rho S y_{cm} g - F_{y_{cm}}(y_{cm}), \tag{2}$$

где $F_{y_{cm}}(y_{cm})$ – вертикальная проекция гидродинамической силы при установившемся течении.

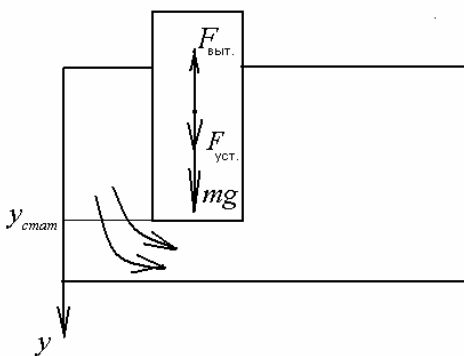


Рис. 4. Расчетная схема

Запишем теперь собственно уравнение движения объекта:

$$m\ddot{y} = mg - \rho S g y + F_{зидро}(y, \dot{y}), \tag{3}$$

здесь и далее точка над буквой означает дифференцирование по времени.

Представим вертикальную координату батопорта как сумму координаты равновесного положения и колебаний около этого равновесного положения:

$$y(t) = y_{cm} + y'(t). \tag{4}$$

Подставим разложение (4) в (3) с учетом уравнения равновесия (2):

$$m\ddot{y}' = -F_{ycm}(y_{стат}) - \rho S g y' + F_{гидро}(y, \dot{y}').$$

Или переобозначив $y' \equiv y$:

$$m\ddot{y} + \rho S g y = F_{гидро}(y, \dot{y}) - F_{ycm}(y_{стат}) \quad (5)$$

и поделив уравнение (5) на m получим:

$$\ddot{y} + k^2 y = F'_{гидро}(y, \dot{y}),$$

где k – собственная частота колебаний батопорта; $F'_{гидро}(y, \dot{y})$ – превышение гидродинамической силы при смещении батопорта над стационарной гидродинамической силой, действующей на батопорт в равновесном положении, отнесенное к единице массы.

В процессе решения задачи моделировался процесс заполнения балластных цистерн. В этом случае уравнение движения батопорта может быть записано так:

$$\ddot{y} + k^2 y = F'_{гидро}(y, \dot{y}) + P(t),$$

где $P(t)$ – линейно возрастающая нагрузка, моделирующая процесс заполнения цистерн. Отметим, что в данной модели может быть приближенно учтено конструкционное демпфирование за счет введения соответствующего члена:

$$\ddot{y} + \beta \dot{y} + k^2 y = F'_{гидро}(y, \dot{y}) + P(t).$$

В расчете, однако, предполагалось $\beta = 0$. Силы вязкого трения учитываются в математической модели движения жидкости, и их вклад определяется при вычислении $F'_{гидро}(y, \dot{y})$ на каждом шаге интегрирования при определении поля потока.

Отметим, что относительно причин возникновения неустойчивости батопорта при посадке на порог существует несколько точек зрения. По одной из них предполагается, что автоколебания связаны со сходом крупномасштабных вихревых структур по типу дорожки Кармана, следовательно, математическое описание этих явлений должно базироваться на модели вязкой жидкости. Другая точка зрения предполагает возникновение автоколебаний за счет силы присоса, появляющейся при уменьшении расстояния между порогом и батопортом за счет увеличения скорости потока в зазоре и, соответственно, уменьшения давления. В этом случае возникновение неустойчивости может быть объяснено на основе модели идеальной жидкости. Так как выделить явно какую-либо из этих причин не представляется возможным, необходимо численное моделирование этого процесса.

Результаты расчета в программном комплексе STAR-CD. В ходе анализа устойчивости батопорта при его посадке на порог рассматривались две формы объекта в поперечном сечении: исходная конструкция А (рис. 5) и конструкция Б с объемом плавучести, размещенным в правой нижней части батопорта (рис. 6).

Решение на неподвижной сетке. В качестве тестовых задач были проведены расчеты на неподвижной сетке. Для конструкции А перепад уровней жидкости равнялся 0.8 м, а для конструкции Б перепад выбирался равным 0.8, 1.4 и 2.5 м. При решении задачи оказалось, что течение устанавливается для обоих рассмотренных вариантов формы сечения. Эти стационарные течения являлись начальными условиями при решении динамической задачи. Отметим, что для варианта Б у нижней поверхности батопорта наблюдается стационарная циркуляционная зона, которая может играть роль «вихревой подушки» при посадке на порог.

Решение при кинематическом возбуждении. Чтобы отработать методику расчета течений в областях с изменяемой геометрией, были проведены расчеты при движении батопорта по гармоническому закону. На приведенных ниже рисунках представлены наиболее характерные особенности нестационарных полей давлений и скоростей при кинематическом возбуждении батопорта с формами сечения А и Б. Для формы А рассматривались

два закона движения: 1) расстояние от нижней горизонтальной поверхности батопорта до порога d изменялось от 7.5 до 4.5 м с периодом 10 с при перепаде уровней жидкости 0.8 м (рис. 7-9); 2) расстояние от нижней горизонтальной поверхности батопорта до порога d изменялось от 7.5 до 1.5 м с периодом 20 с при том же перепаде уровней (рис. 10). В обоих случаях течение со временем становится периодическим с периодом, соответствующим закону возбуждения. На рис. 11, 12 представлены поля давлений и скоростей при кинематическом возбуждении батопорта формы Б. При этом расстояние от нижней горизонтальной поверхности батопорта до порога d изменялось от 7.5 м до 1.5 м с периодом 20 с при перепаде уровней 0.8 м.

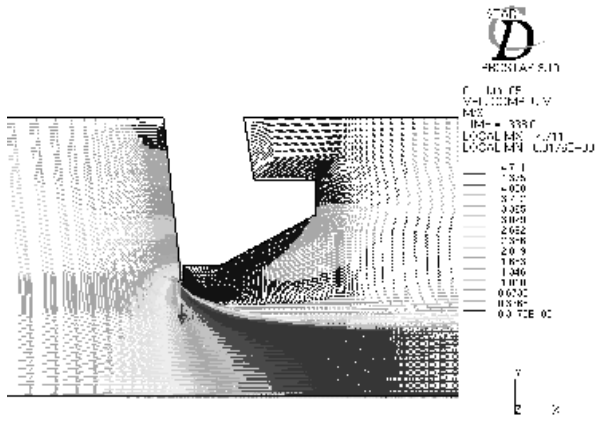


Рис.5. Форма А, расчет на неподвижной сетке, перепад 0.8 м

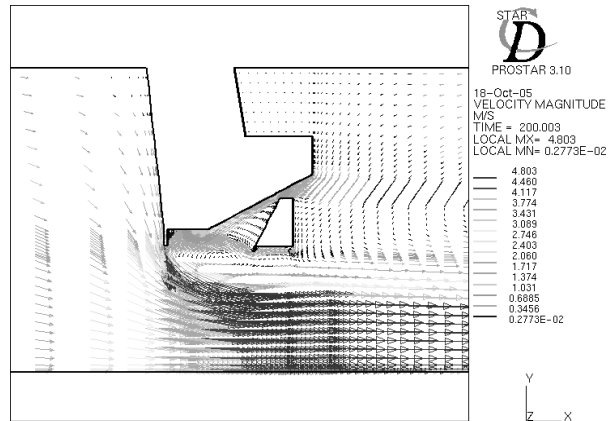


Рис. 6. Форма Б, расчет на неподвижной сетке, перепад 0.8 м

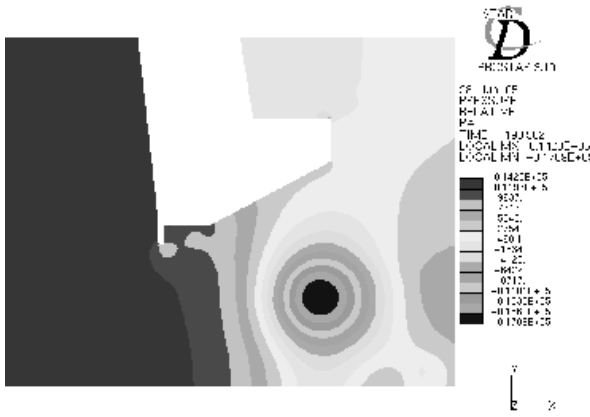


Рис. 7. Форма А, поле давлений при первом законе движения; образование и срыв крупномасштабных вихревых структур

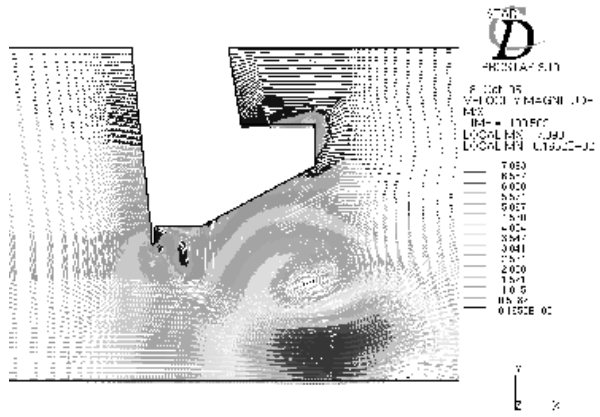


Рис. 8. Форма А, поле скоростей при первом законе движения; образование и срыв крупномасштабных вихревых структур



Рис. 9. Форма А, поле давлений при первом законе движения; формирование зоны разрежения при приближении объекта к порогу

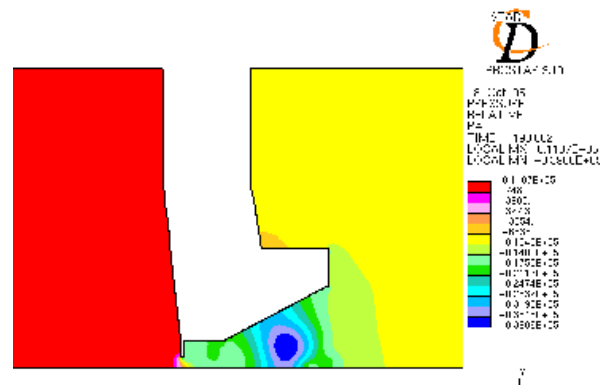


Рис. 10. Форма А, поле давлений при втором законе движения; формирование зоны разрежения при приближении объекта к порогу

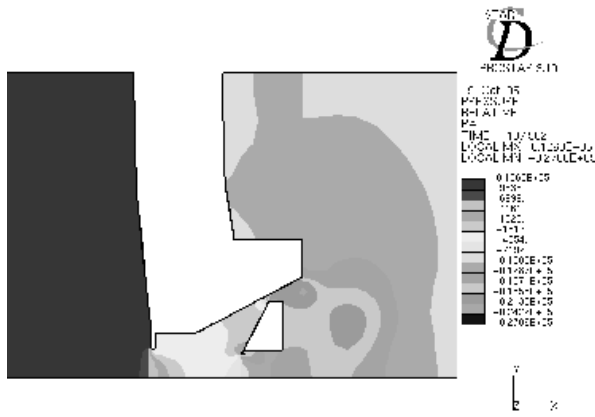


Рис. 11. Форма Б, поле давлений, формирование зоны разряжения при приближении объекта к порогу

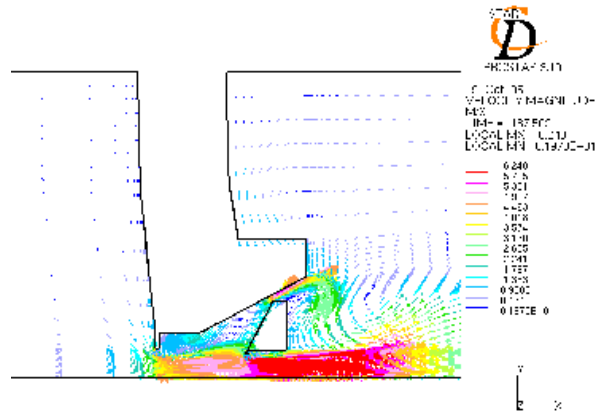


Рис. 12. Форма Б, поле скоростей при приближении объекта к порогу

При колебаниях по первому закону возбуждения (форма А) при движении объекта вниз у нижней поверхности батопорта за выступом начинает формироваться зона низкого давления с образованием вихря. Максимальное разряжение наблюдается при приближении батопорта к порогу. Поэтому можно говорить о том, что гидродинамические силы являются дестабилизирующим фактором, приводящим к возникновению колебаний батопорта. Затем при движении батопорта вверх этот крупномасштабный вихрь отрывается и смещается вниз по потоку.

При колебаниях батопорта по второму закону движения (форма А) отрыв вихря выражен не столь явно, ввиду меньшей скорости движения объекта, однако опять же при приближении батопорта к порогу наблюдается зона разряжения. Таким образом, показано, что гидродинамические силы являются основным дестабилизирующим фактором при приближении батопорта к порогу.

Закон колебаний батопорта формы Б аналогичен второму закону движения для формы А. Поэтому можно сравнить получаемые поля давлений и скоростей для двух форм объекта. Здесь также при приближении объекта к порогу начинает формироваться зона низкого давления, однако разряжение выражено не столь явно, чем для формы А. И влияние дестабилизирующих гидродинамических сил проявляется в меньшей степени. Отметим, что объем плавучести играет роль разрушителя крупномасштабных вихревых структур. Четко видна «вихревая подушка» при приближении к порогу.

Заданные законы движения были скорее тестовыми, чтобы отработать методику расчета течений в областях с изменяемой геометрией и, собственно, подойти к решению динамической задачи.

Решение сопряженной задачи динамики батопорта и течения жидкости. Как уже указывалось выше, в рамках решения динамической задачи были рассмотрены две формы сечения объекта. В начальный момент времени батопорт (форма Б) находится на расстоянии 4.5 м до порога, и наблюдается установившееся поле течения при перепаде 0.8 м. Затем объекту сообщается начальное возмущение (задается скорость равная 0.4 м/с). На рис. 13 представлены результаты расчета движения батопорта с формой сечения Б при отсутствии работы балластных цистерн при заданных начальных условиях. Видно, что объект совершает затухающие колебания около стационарного состояния. Отметим, что затухание обусловлено исключительно вязкими свойствами жидкости. За нулевой уровень на графиках здесь и далее принято положение батопорта соответствующее 4.5 м до порога, ось у направлена вертикально вниз, то есть с увеличением у батопорт приближается к порогу.

На рис. 14 представлено движение батопорта при работе балластных цистерн (для ускорения расчета процесс заполнения балластных цистерн происходит за 300 с). Как и в предыдущем случае в начальный момент времени ($t = 200$ с) мы имеем стационарное течение около батопорта при $d = 4,5$ м и перепаде уровней воды 0.8 м. Затем объекту сообщается скорость, направленная вниз, равная 0.2 м/с, и начинается процесс заполнения балластных цистерн. График показывает, что начальное возмущение интенсивно затухает и затем наблюдается установившийся процесс погружения вплоть до $t = 500$ с. После завершения заполнения цистерн наблюдаются незначительные затухающие колебания малой амплитуды, обусловленные инерционными свойствами объекта. Поле скоростей при $t = 520$ с представлено на рис.15.

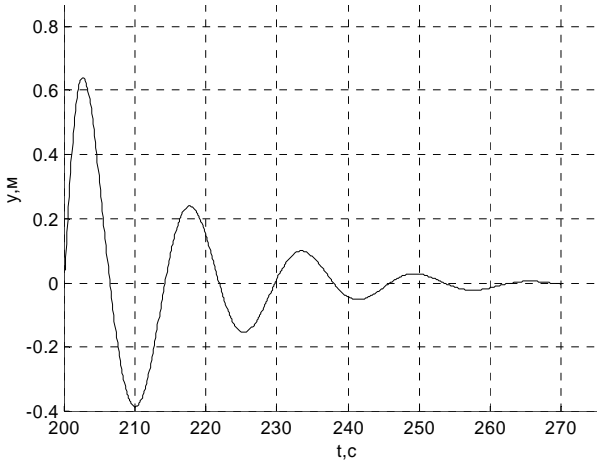


Рис. 13. Форма Б, движение батопорта после начального возмущения

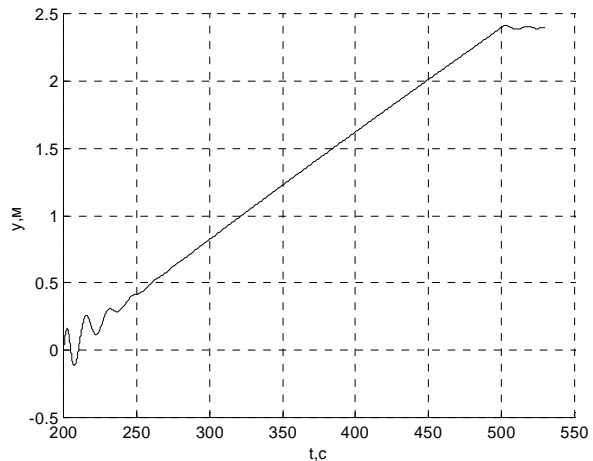


Рис. 14. Форма Б, движение батопорта при работе балластных цистерн, перепад 0.8 м

На рис. 16 представлен график движения батопорта с сечением Б при перепаде уровней 1.4 м и начальном возмущении 0.4 м/с. В этом случае при существенно более жестких условиях также наблюдаются затухающие колебания с выходом на стационарный режим при заполнении балластных цистерн. Но здесь мы уже приближаемся к случаю потери устойчивости, рассмотренному далее, поэтому перепад 1.4 м можно назвать критическим для формы Б поперечного сечения батопорта. При окончании заполнения балластных цистерн, как и в предыдущем случае, наблюдаются малые колебания, обусловленные инерционными эффектами.

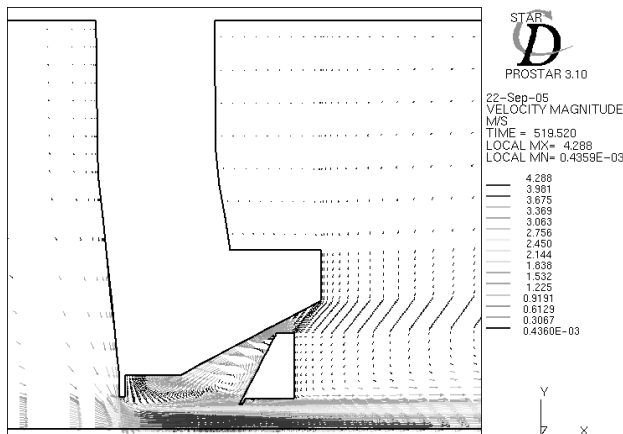


Рис. 15. Форма Б, поле скоростей после посадки, перепад 0.8 м

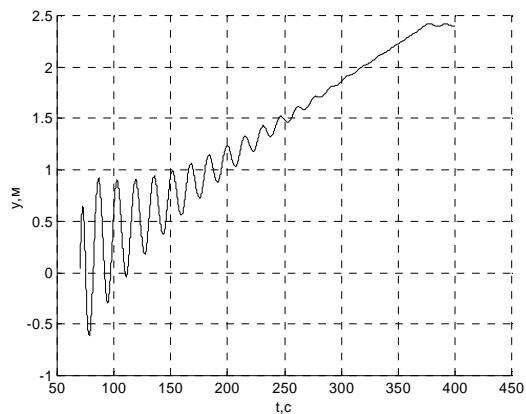


Рис. 16. Форма Б, движение батопорта при работе балластных цистерн, перепад 1.4 м

Для исследования влияния типа модели турбулентности на получаемые результаты этот же случай был смоделирован с использованием нелинейной квадратичной $k - \epsilon$ модели. Представленные на рис. 17 результаты и сравнение их с результатами движения на рис. 16 показывают, что переход на другую модель турбулентности не приводит к заметному изменению движения объекта.

При перепаде 2.5 м для батопорта с сечением Б колебания становятся незатухающими (рис. 18) и происходят удары о порог. Этот режим следует назвать аварийным для представленного варианта сечения.

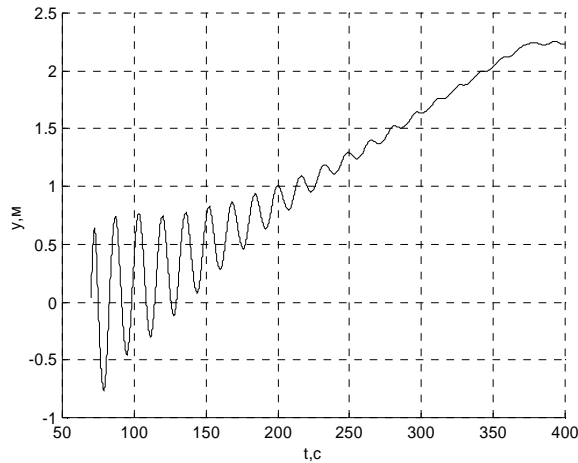


Рис. 17. Форма Б, движение батопорта при работе балластных цистерн, перепад 1.4 м, квадратичная $k - \epsilon$ модель

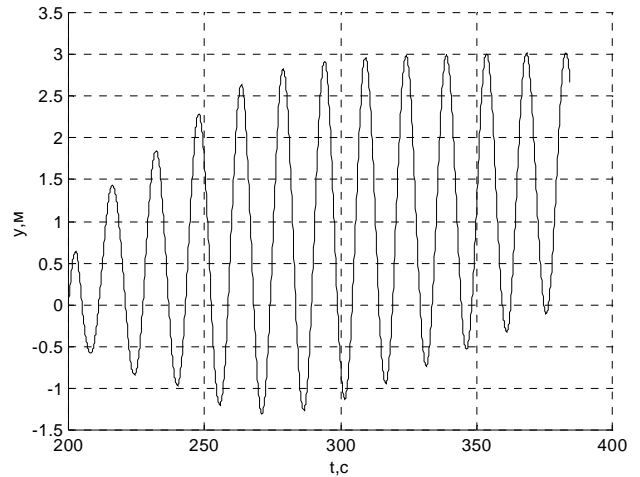


Рис. 18. Форма Б, движение батопорта при работе балластных цистерн, перепад 2.5 м

Следующие результаты касаются исследования динамики батопорта с сечением А. При задании перепада 0.8 м, начальной скорости 0.4 м/с и при моделировании процесса заполнения балластных цистерн оказалось, что батопорт с данной формой динамически не устойчив и совершает незатухающие колебания с соударениями о порог (рис. 19).

По всей видимости, причиной этой неустойчивости является вихрь низкого давления (рис. 20), который образуется за выступом и приводит к существенно большему значению вертикальной составляющей гидродинамической силы, чем в случае Б, где поток оказывается как бы заперт между выступом и дополнительным объемом плавучести.

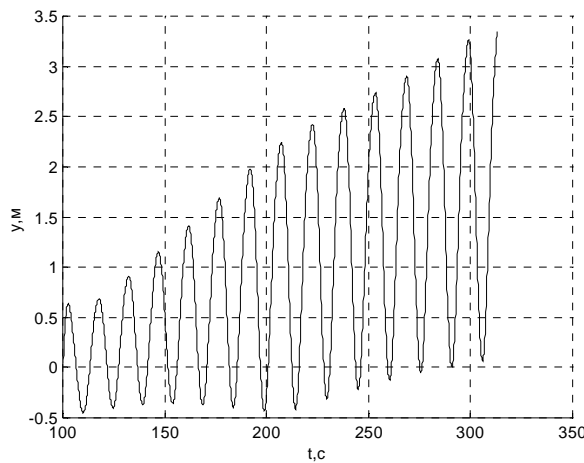


Рис. 19. Форма А, движение батопорта при работе балластных цистерн, перепад 0.8 м

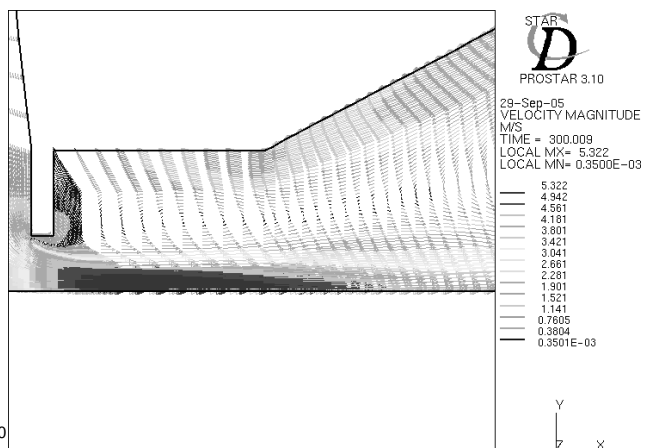


Рис. 20. Форма А, нестационарное поле скоростей, перепад 0.8 м

Отметим, что данный расчет позволяет сопоставить динамику объектов разной формы при сходных начальных условиях, в том числе при аналогичных моделях турбулентности. Однако выбор наиболее подходящей модели турбулентности, которая наиболее точно описывает силовое гидродинамическое воздействие на объект, должен осуществляться на основе сопоставления с результатами экспериментальных исследований.

Созданная математическая модель, по крайней мере, в сопоставительном плане, позволила исследовать динамику двух вариантов конструктивного исполнения створки батопорта при посадке на порог.

Результаты исследований показали, что изменение формы сечения створки батопорта путем установки дополнительного элемента (объема плавучести) может существенно улучшить его динамические характеристики в плане устранения возможных автоколебательных режимов. Предложенная доработанная форма Б обладает значительно большим порогом устойчивости, чем исходная форма А и устойчива вплоть до перепада уровней воды 1.4 м.

Представленное исследование позволило расчетным путем обосновать проведение экспериментальных работ по увеличению порога устойчивости сооружения за счет изменения структуры потока в нижней части створки батопорта, которые полностью подтвердили результаты математического моделирования.

Summary

The article investigates the motion of floating gate shutter that blocks a navigation pass due to flooding of ballast tanks. The software package *Star-CD* by Computational Dynamic, London is used to simulate viscous fluid. Comparative analysis of motion of a floating gate with the initial shape of a shutter cross-section and a shutter with an additional structural element (volume of flotation), that changes the flow structure when the object approaches the bottom and acts as a destroyer of large-scale vortex, was made. It is demonstrated that continuous oscillations of the shutter take place under a certain difference in fluid level (stability threshold). At the same time, the value of stability threshold of the additionally developed structure turns out to be much higher. The results presented make it possible to determine trends for increasing stability threshold.

Литература

1. Ден-Гартог Дж.П. Механические колебания. М.: ГИФМЛ, 1960.
2. Баранов П.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Харченко В.Б. Расчет колебаний цилиндрического маятника в наполненной вязкой жидкостью полости с использованием скользящих многоблочных сеток // ИФЖ. 2003. Т.76. № 5. С.61-70.

Статья поступила в редакцию 28.10.2007 г.