

УДК 627.09:627

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВОДНОГО ПОТОКА ПОСТУПАЮЩЕГО В КАМЕРУ СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА

Бандин Денис Алексеевич<sup>1</sup>, аспирант  
e-mail: [bandin\\_deniska3@mail.ru](mailto:bandin_deniska3@mail.ru)

<sup>1</sup> Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** В работе исследуются гидродинамические силы, действующих на судно при наполнении камеры шлюза, так как они являются определяющим фактором безаварийности и интенсивности процесса шлюзования. Главным критерием в определении гидродинамических сил, является нахождение уклонов свободной поверхности в камере. Ранее выполнявшиеся расчеты и их анализ, показали значительную качественную некорректность в определении уклонов методом Христиановича, когда в камере шлюза находится судно. Поэтому, для дальнейших исследований предлагается использовать другой более корректный и близкий к реальности подход, основанный на использовании подвижной сетки, который описывает движение шлюзуемого судна в камере.

**Ключевые слова:** камера судоходного шлюза, гидродинамические силы, уклон свободной поверхности, метод Христиановича, водный поток, подвижная сетка, математическое моделирование.

## INVESTIGATION OF THE ENERGY OF THE WATER FLOW ENTERING THE CHAMBER OF THE SHIPPING LOCK

Bandin Denis Alekseevich<sup>1</sup>, Doctoral Student  
e-mail: [bandin\\_deniska3@mail.ru](mailto:bandin_deniska3@mail.ru)

<sup>1</sup>Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** Investigation of the hydrodynamic forces acting on the vessel when filling the lock chamber. The main criterion in determining the hydrodynamic forces is to find the slopes of the free surface in the chamber. The previously obtained results showed the ineffectiveness of determining the slopes by the Khristianovich method when a ship is in the lock chamber. Therefore, for further research, it is proposed to use another method based on the creation of a movable grid, which describes the movement of the lockable vessel in the chamber.

**Keywords:** the chamber of the shipping lock, hydrodynamic forces, the slope of the free surface, the Khristianovich method, water flow, movable grid, mathematical modeling.

Система наполнения-опорожнения головных устройств имеет особенность высокой чувствительности к интенсивности потока воды, который поступает через голову шлюза. При повышении скорости наполнения камеры, время, необходимое для ее заполнения,

сокращается. Однако, данная интенсификация имеет свои побочные эффекты. Волны, вызванные этим процессом, оказывают воздействие на шлюзующееся судно, что может привести к его дифференту и навалу на швартовые канаты. В результате, разрывное усилие на них возрастает, а это уже может привести к техногенной катастрофе.

Вопрос оптимизации скорости подачи воды в камеру весьма актуален. С одной стороны, необходимо обеспечить быстрое заполнение камеры шлюза, а с другой - гарантировать безопасные условия для судна. Для решения этой дилеммы можно применить установку гасительных элементов, которые будут улучшать гидродинамическое воздействие на судно. Это позволит сократить время наполнения шлюза и значительно ускорить процесс судопропуска.

Существующие подходы к решению задачи, базируются на решении одномерной системы уравнений Сен-Венана. Но их базовый подход изначально предопределяет большие расхождения с натурными величинами.

В связи с этим возникает необходимость в разработке методики для исследования гидродинамики шлюзовой камеры, которая могла бы выявить влияние каждого из компонентов гашения на снижение энергетической нагрузки на судно при проходе. Нестационарное влияние каждого из компонентов на гашение энергии требует значительных расходов на измерительные приборы, что является практически невозможным и финансово невыгодным. В дальнейшем рекомендуется использовать один из наиболее современных научных методов, основанных на математических моделях.

Данный подход к анализу гидродинамических процессов через использование математического моделирования, ранее уже применялся рядом авторов.

Так, например, в работе Чичкина О.И. [1], для определения гидравлического уклона потока использовалась формула (1). Отношение горизонтальной составляющей движения массы воды, заполняющей камеру к текущему моменту к вертикальной. Причем в качестве вертикальной составляющей автор ограничился рассмотрением только вертикальной составляющей:

$$I = \frac{a}{g} = \frac{\sum F}{\sum M \cdot g} = \frac{\sqrt{F_x + F_y} - C_{ш}}{M_{(t)} \cdot g}, \quad (1)$$

где  $F_x$  и  $F_y$  – суммарные проекции от суммы сил действующий на массу воды из вне. Как правило — это механические реакции со стороны конструктивных элементов на весовое воздействие потока в процессе его волнового движения;

$M$  – воды заполнившего камеру к данному моменту;

$g$  – ускорение силы тяжести.

На основе формулы, автор, при математическом моделировании, вычислял общую энергию, которая определяла динамику процесса наполнения. По этой энергии определялись внешние силы, воздействующие на объем воды в шлюзовой камере, и, в конечном итоге, усилие,двигающее поток через шлюзовую камеру. Отношение горизонтальной составляющей этого усилия к вертикальной давало уклон свободной поверхности. Умножение этого уклона на смещение воды судна давало величину гидродинамического усилия, срыва.

Первые теоретические работы по решению задачи имеются у Михайлова [2]. Поэтому в работе [1] Чичкин О.И., для отслеживания функций изменения площадей живого сечения вдоль камеры шлюза в процессе пробега волны по камере, по аналогии с предшественниками, ограничился только рассмотрением величины площади живого сечения, без относительного влияния его местоположения на кинематическую структуру потока. Такой допуск был вполне правомерен для задачи с одномерной волной. Для его практической реализации, академик Христианович, предложил присутствующий в камере корпус шлюзующегося судна заменить эквивалентным уступом, и с таким упрощением выйти на численные результаты.



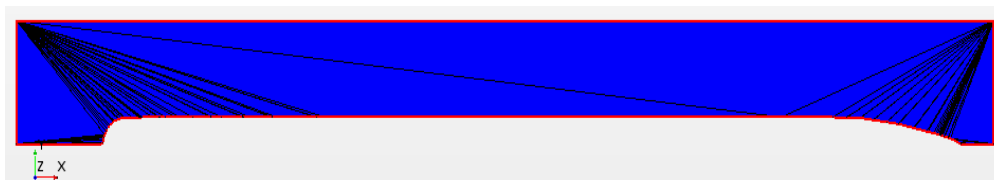


Рисунок 1 – Схема расчетной области в камере шлюза, с учетом уступа в виде корпуса судна по гипотезе Христиановича

В рамках задачи с одномерной волной, согласно гипотезе академика Христиановича, используя этот метод становится непринципиальным каким образом у нас корпус судна будет расположен в процессе наполнения камеры шлюза, так как в решение фигурирует только изменение площади живого сечения потока. Крен судна принимался полностью совпадающим с уклоном свободной поверхности воды. В решении фигурирует только изменение площади живого сечения по длине потока, для определения уклона. В результате становится совершенно неважно как расположен корпус судна в потоке заполняющим камеру шлюза. В результате отпадает необходимость в постоянном отслеживании перемещения корпуса судна при подъёме в процессе шлюзования, и задача существенно упрощается. С точки зрения математической физики, задача из класса задач с изменяющейся расчетной область, переходит в класс задач со стационарными границами расчетной области. При этом возникает небольшая ошибка, возникающая за счет крена судна, при его перемещении и изменении живых подкорпусных сечений, но учитывая, что угол наклона всего лишь не превышает 4-ех минут, то 1/15 градуса существенного влияния эти деформации водного потока на гидродинамику потока не покажут.

Однако, данный подход правомерен в использовании только одномерного подхода, поскольку можно пойти по пути подсчета площадей по контрольным сечениям и через них получать уклон на исследуемом участке. В случае использования двух или трехмерного решения, которые будут реализовываться далее, этот путь предопределяет качественно некорректные результаты для моделирования и как следствие – неверные результаты. Так, например, анализируя линии тока и вектора скоростей, их направление, можно заметить, что поле векторов скоростей в районе балок гашения при использовании подхода-метода Христиановича, будет смещаться вверх ближе к свободной поверхности, что впринципе не соответствует действительности. Такой подход использовался в работах [3] и показал свою революционность (продвинутость) по сравнению с методом на базе уравнений Сен-Венана, но включал вышеизложенные недостатки. Более развернуто, некорректность постановки задачи иллюстрирует рис. 2.



Рисунок 2 – Распределение линий тока (векторов скоростей) в области балок гашений при использовании метода Христиановича

Однако на практике, поле векторов скоростей, имеет характер движения совершенно иной. обтекая корпус шлюзующегося судна снизу (под дном корпуса судна) смещение векторов приходится в сторону нижних балок и под судном, находящимся при шлюзовании в камере шлюза. Схема распределения поля вектором скоростей, представлена на рисунке 3.

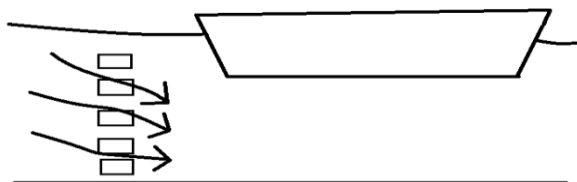


Рисунок 3 – Распределение векторов скоростей в области балок гашений на практике

Для улучшения точности результатов математического моделирования рекомендуется применять метод подвижной сетки. Подвижная сетка, или *overset mesh*, представляет собой технологию, которая позволяет учитывать движение компонентов и сложность геометрии. Этот тип сетки состоит из фоновой сетки, которая адаптирована к окружающей среде, а также одной или нескольких сеток, привязанных к объектам и перекрывающих фоновую сетку.

Для имитации движения корпуса судна при наполнении используется блок подвижной сетки, который перемещается вокруг корпуса на каждом временном шаге на объем воды, поступающий в камеру шлюза. Этот объем воды, действуя через силу Архимеда, поднимает судно вверх.

Угол наклона свободной поверхности (крен судна) определяется по данным отметкам свободных поверхностей в двух контрольных сечениях.

Данный вариант решения, через подвижную сетку, позволит более точно решать задачу, так как более качественно воспроизводит гидродинамические процессы, сопровождающие процесс наполнения камеры шлюза, даже в случае двумерного подхода. По мимо этого, используя решение в [4], мы получаем возможность более дискретно проанализировать долевые составляющие уклонов свободной поверхности в процессе наполнения камеры шлюза и наметить пути улучшения как конструкции гасительных элементов, так и режимов наполнения камеры. Наиболее очевидным здесь является разложение общего уклона свободной поверхности воды в камере на основные силовые компоненты [4]:

$$\dot{i} = I_{dif.V(t)} + I_{div V} + I_{ex\ nom} + I_{сум. сил.} + I_{турб\ напр.} - I_{град\ давл.} - I_{FS\ к.г.} \quad (2)$$

где  $I_{dif.V(t)}$  – уклон от полного дифференциала скорости по времени;

$I_{div.V}$  – уклон от дивергенции векторного поля скорости;

$I_{ex\ nom}$  – уклон от втекающего в шлюз потока воды;

$I_{сум\ сил.}$  – уклон от механической реакции по бетонному контуру;

$I_{турб\ напр.}$  – уклон от потерь энергии на турбулизацию;

$I_{град\ давл.}$  – уклон от градиентов давления по потоку в камере;

$I_{FS\ к.г.}$  – уклон свободной поверхности в камере гашения;

Исходя из формулы видно, что одним из компонентов входящих в формулу определения уклона в камере шлюза, является расчет уклона от дивергенции векторного поля скорости.

В дальнейших исследованиях, предполагается использование метода подвижной сетки, который как мы надеемся, позволит получать достоверный результат при математическом моделировании.

Данный математический аппарат позволит решить эту задачу на новом качественном уровне без прошлых недочетов, что присутствовали в работе, изложенной выше и привнести новую перспективу в анализ гидродинамических сил в процессе шлюзования.

### Список литературы:

1. Чичкин О.И. Численное моделирование гидродинамических процессов в камере гашения. Морские интеллектуальные технологии / Marine intellectual technologies № 4 Т.2,

2019/№ 4 V.2, 2019 208 Донского шлюза / сборник материалов юбилейное международной научно-практической конференции посвященной 110-летию создания гидротехнической лаборатории имени проф. В.Е. Тимонова – Т. 2. – СПГУВК – 2017 – С. 73 – 81.

2. Михайлов, А.В. Головные системы питания судоходных шлюзов. / А.В. Михайлов. – М.: Минречфлот СССР, 1951. – 172 с.

3. Липатов И.В., Ситнов А.Н., Чичкин О.И. Аналитический подход к оценке эффективности работы элементов гашения энергии потока в транспортных гидротехнических сооружениях. МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ/ 4 (42) Т. 2 – 2018.

4. И.В. Липатов, Д.А. Бандин. Методика оценки эффективности работы каждого элемента камеры гашения шлюза в процессе наполнения // Санкт-Петербург. – Издательство ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2023 // Гидротехнические сооружения водных путей // Сборник научных трудов – Выпуск 6, Часть 2. – 5 с.

5. Гапеев, А.М. Влияние отдельных элементов верхней головы шлюза на гидравлические параметры потока / А.М. Гапеев // Труды ЛИИВТа. – 1984. – Гидротехнические сооружения и путевые работы на внутренних водных путях для судоходства. – С. 148 – 155.

6. Липатов, И.В. Гидродинамика речных потоков и ее влияние на эксплуатационные параметры судоходных гидротехнических сооружений: методология исследований. – Монография. / И.В. Липатов. – Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2006. – 100с.

7. Липатов, И.В. Математическое моделирование гидродинамических процессов в процессе эксплуатации шлюзованных водных путей. / И.В. Липатов // – Нижний Новгород. – материалы IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. – тезисы докладов. изд. ННГУ. – 2006. т. 2, – с. 119.

8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар С. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

9. Hirt, C.W. Volume of Fluid (VOF) method for dynamical free boundaries / C.W. Hirt, B.D. Nicholls// J. Comput. Phys., 1981. № 39, pp. 201 – 225.

10. El Tahry, S.H. k- $\epsilon$  equation for compressible reciprocating engine flows / S.H. El Tahry // – AIAA J. Energy, – 1983. – No. 4, pp. 345 – 353.

11. Launder, B.E. The numerical computation of turbulent flows / B.E. Launder, D.B. Spalding // Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 1974, №3, pp. 269 – 289.

