

COMPENSATION OF THE FIRST REVERSE PEAK OF THE HYDRODYNAMIC FORCE DURING FILLING OF THE LOCK CHAMBER WITH A HEAD SUPPLY SYSTEM

K. P. Morgunov, V. G. Bogatyrev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

This paper presents research aimed at studying the hydraulics of the filling process of navigation locks with a head supply system feeding from beneath flat lifting and lowering gates. In particular, the problem of compensating the first reverse peak of the hydrodynamic force by varying the area of the filling opening is considered. The change in the filling opening area was analyzed both for cases of constant size and for cases of reduction. In a theoretical experiment, the timing and intensity of the change in the filling opening area were synchronized with the wave propagation speed in the lock chamber. The first release wave formed at the start of filling must be compensated by a second wave, which is forcibly created by reducing the cross-sectional area of the filling opening, followed by its increase. The parameters of the second compensating wave were determined so that its interaction with the first release wave eliminates the first peak of the reverse hydrodynamic force. The mode of changing the filling opening area was also studied. To achieve this, theoretical methods based on solving unsteady water motion equations were used, allowing determination of free surface fluctuations in the lock chamber, including at the initial filling stage. The results show, for various vessel displacements, the dependence of hydrodynamic force magnitude on the modes of filling opening area change and on the related increment of water flow. The findings can help create safe locking conditions for both current and future unmanned vessels.

Keywords: navigation lock, filling hydraulics, head supply system, hydrodynamic force, wave oscillations, flow rate increment coefficient

For citation:

Morgunov, Konstantin P. and V. G. Bogatyrev “Compensation of the first reverse peak of the hydrodynamic force during filling of the lock chamber with a head supply system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 340–349. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-340-349. — EDN EOKVWY.

УДК 656.62.052.4

КОМПЕНСАЦИЯ ПЕРВОГО ОБРАТНОГО ПИКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛЫ ПРИ НАПОЛНЕНИИ КАМЕРЫ ШЛЮЗА С ГОЛОВНОЙ СИСТЕМОЙ ПИТАНИЯ

К. П. Моргунов, В. Г. Богатырёв

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследования, представленные в работе, направлены на изучение гидравлики процесса наполнения судоходных шлюзов с головной системой питания из-под плоских подъемно-опускных ворот. В частности, рассмотрена задача о возможности компенсации первого обратного пика гидродинамической силы путем изменения площади отверстия наполнения. Изменение площади отверстия наполнения рассмотрено в том числе для случаев постоянной величины площади и для случаев ее уменьшения. В теоретическом эксперименте временной промежуток и интенсивность изменения площади отверстия наполнения синхронизировались со скоростью распространения волн в камере шлюза. Первую волну пуска от сформировавшегося в начале процесса наполнения необходимо компенсировать второй волной, которая создается принудительно путем уменьшения площади сечения отверстия наполнения с последующим переходом к ее увеличению. В исследовании определялись параметры второй компенсационной волны, чтобы при взаимодействии с первой волной пуска отсутствовал первый пик обратной гидродинамической силы. Исследовано также влияние на воз-

никновение пика обратной силы режима изменения площади отверстия наполнения. Для реализации поставленной задачи использованы теоретические методы, основанные на решении уравнений неустановившегося движения воды, позволяющие определить колебания свободной поверхности воды в камере шлюза, в том числе на начальном этапе наполнения. Результаты, полученные в исследовании, показывают для различных водоизмещений судна зависимости изменения величины гидродинамической силы от режимов изменения площади отверстия наполнения и от взаимосвязанного с площадью изменения приращения расхода воды. Полученные результаты исследования могут быть направлены на создание безопасных условий для шлюзования как судов действующего флота, так и перспективного безэкипажного флота.

Ключевые слова: судоходный шлюз, гидравлика наполнения, головная система питания, гидродинамическая сила, волновые колебания, коэффициент приращения расхода, фронт волны.

Для цитирования:

Моргунов К. П. Компенсация первого обратного пика гидродинамической силы при наполнении камеры шлюза с головной системой питания / К. П. Моргунов, В. Г. Богатырёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 340–349. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-340-349. — EDN EOKVWY.

Введение (Introduction)

При наполнении (опорожнении) камер судоходных шлюзов шлюзующиеся суда испытывают гидродинамическое воздействие потока, обусловленное неустановившимся движением воды, которое изменяется как по величине, так и по направлению. Гидродинамическое воздействие потока на шлюзуемое судно наиболее значимо проявляется при наполнении (опорожнении) камер шлюзов с головной системой питания. При головной системе питания сосредоточенно поступающая в камеру вода движется от верхней головы к нижней в виде длинной пологой волны повышения уровня. Дойдя до нижней головы, фронт волны отражается от ее створа и начинает движение к верхней голове, отражается от нее и снова движется к нижней голове. Так волна движется в течение всего процесса наполнения, формируя несколько пиков силового воздействия на судно как в прямом, так и в обратном направлении.

Процессы наполнения и опорожнения камеры судоходных шлюзов достаточно изучены [1]–[3], однако степень изученности ограничивается условием, при котором шлюзующееся судно считается неподвижно закрепленным. В практике эксплуатации это реализуется закреплением судна швартовными канатами на специальных устройствах — плавучих рымах, либо вместо канатов могут использоваться автоматические швартовные устройства, также интегрированные с плавучими рымами [4]. Гидродинамическая нагрузка на судно передается на швартовные канаты и затем на плавучие рымы. Допустимая величина этой нагрузки ограничена усилиями, которые гарантированно могут выдержать швартовные канаты [5]–[8]. Однако для случаев шлюзования судов без использования швартовки [9] или шлюзования в условиях отрицательных температур [10], [11], когда использование плавучих рымов для швартовки невозможно ввиду их обмерзания, процессы гидродинамического воздействия на судно исследованы в гораздо меньшей степени.

Задачей настоящего исследования является определение условий, при которых уменьшается величина первого пика обратной гидродинамической силы, действующей на шлюзующееся судно на начальном этапе наполнения камеры, или такой пик обратной гидродинамической силы полностью исключается.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Величина полной продольной гидродинамической силы, действующей на судно при шлюзовании, может быть представлена в виде суммы:

$$P = P_{\text{в}} + P_{\text{с}} + P_{\text{м}},$$

где $P_{\text{в}}$ — волновая составляющая силы, обусловленная движением в камере длинной волны малой амплитуды;

$P_{\text{с}}$ — составляющая, обусловленная скоростью течения воды в камере, вызывающая силу гидравлического сопротивления;

P_m — местные силы (силы инерции), обусловленные неравномерностью распределения скоростей течения в камере.

Величина волновой составляющей гидродинамической силы главным образом зависит от водоизмещения судна W и уклона поверхности воды в камере i на участке, на котором расположено судно, и рассчитывается по формуле

$$P_b = Wi. \quad (1)$$

Величина скоростной составляющей гидродинамической силы, которая зависит от соотношения площади миделевого сечения судна $\otimes$ и площади свободного живого сечения камеры Ω_k , имеет наибольшие значения в начале наполнения.

В работе А. В. Михайлова [12] предложена формула для расчета гидродинамической силы от скоростного воздействия потока:

$$P_c = \left\{ \delta \varphi \otimes [1 + (m_c - 1)\alpha^2] + \frac{1}{3} \left(f \Omega_c + \frac{W}{C^2 R} \right) \right\} \left(\frac{Q}{\Omega_k - \otimes} \right)^2,$$

где φ — коэффициент остаточного сопротивления;

δ — коэффициент полноты водоизмещения;

m_c — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей течения в месте поступления расхода воды в камеру;

α — коэффициент, учитывающий ограниченность водного пространства, в котором находится судно;

f — коэффициент трения воды о корпус судна;

Ω_c — смоченная поверхность судна;

W — водоизмещение судна;

C — коэффициент Шези;

R — гидравлический радиус свободной площади живого сечения в месте расположения судна;

Q — расход воды в створе поступления.

Формула для расчета скоростной составляющей гидродинамического воздействия приведена также в работе [2]:

$$P_c = K \otimes \left(\frac{Q}{\Omega_k - \otimes} \right)^2 \left(1 - \frac{l_n + \frac{1}{2} l_c}{L_k} \right)^2,$$

где K — коэффициент сопротивления $\left(K = 0,15 - 0,20 \frac{\text{кН} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4} \right)$;

l_n — расстояние от носа судна до створа поступления расхода;

l_c — длина судна;

L_k — длина камеры шлюза.

Местные силы, определяемые в основном инерционными явлениями, рассчитываются по формуле [2]:

$$P_m = K_m m_c \frac{dv_c}{dt},$$

где K_m — коэффициент, характеризующий силы инерции в долях от массы судна (по данным лабораторных исследований принимается приближенно $K_m = 0,3$);

m_c — масса судна;

v_c — скорость течения в створе расположения судна (посередине его длины).

Совместное воздействие трех составляющих гидродинамической силы может привести к максимальным значениям гидродинамической силы особенно на начальном этапе наполнения, когда скоростная составляющая P_c имеет наибольшие значения, что способствует неблагоприятным условиям стоянки особенно для судов, имеющих максимальные габариты и осадку.

Как показали исследования [2], волновая часть P_v является основной составляющей гидродинамической силы и ее величина в головных системах питания, даже оснащенных современными гасительными устройствами, может достигать 90–95 % от величины суммарной силы. Поэтому основной задачей гидравлических расчетов процесса наполнения судоходного шлюза с головной системой питания является установление параметров колебаний свободной поверхности воды в камере, которые зависят от габаритов шлюза, напора на камеру, характеристик системы наполнения, конструктивных особенностей системы гашения и скоростных режимов изменения площади отверстия наполнения. Из данных параметров в зависимости от длины судна и его расположения относительно полезной длины камеры определяется величина изменения уровня воды у носа и кормы судна (определяющая уклон) и волновая составляющая гидродинамической силы (формула (1)).

Для определения параметров колебания уровня свободной поверхности, в том числе на начальном этапе наполнения камеры шлюза с головной системой питания, используются уравнения неустановившегося движения воды:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial(v\Omega)}{\partial s} = 0; \\ \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial s} u + \frac{\partial h}{\partial s} + \frac{v|v|}{C^2 R} - i = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где Ω — площадь живого сечения потока;

v — средняя скорость в сечении;

t — время;

s — координата вдоль потока;

g — ускорение свободного падения;

h — глубина потока;

R — гидравлический радиус свободной площади живого сечения в месте расположения судна;

C — коэффициент Шези;

i — уклон дна.

Система уравнений (2) относится к классу гиперболических уравнений и не имеет решения в конечном виде. Для ее решения в исследованиях используется метод Галеркина, изложенный в работах [13], [14], при этом используется расчетная схема, предложенная А. В. Михайловым [12].

Процессы изменения положения свободной поверхности в камере шлюза носят колебательный характер и наиболее близко могут быть описаны с помощью теории длинных волн. Скорость распространения волны в камере шлюза без судна определяется по формуле Лагранжа:

$$C = \sqrt{g \frac{\Omega_k}{B_k}} = \sqrt{g s_{cp}},$$

где B_k — ширина камеры.

При расположении в камере судна скорость движения волны C_c в пределах судна уменьшается из-за стеснения площади живого сечения камеры его корпусом на величину $\otimes$:

$$C_c = \sqrt{g \frac{\Omega_k - \otimes}{B_k}}.$$

Таким образом, основным интерес представляет исследование начального этапа процесса наполнения камеры шлюза с головной системой питания, так как именно в это время формируются максимальные значения гидродинамической силы, действующей на шлюзуемое судно.

Результаты (Results)

Характерный вид графиков изменения гидродинамической силы на начальном этапе шлюзования приведен на рис. 1.

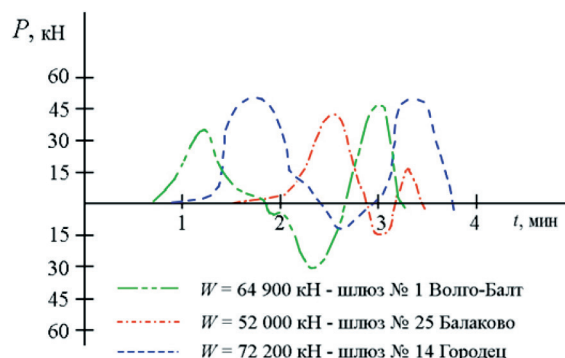


Рис. 1. Совмещенные графики гидродинамической силы, действующей на судно в начальный период при наполнении камеры шлюза с головной системой питания из-под плоских подъемно-опускных ворот

Как известно [13], [14], волновая составляющая гидродинамической силы зависит не от величины расхода воды Q , а от величины его приращения во времени $\frac{dQ}{dt}$. Это приращение имеет наибольшее значение в начальный период наполнения при наибольшем напоре на камеру — рис. 2 [2].

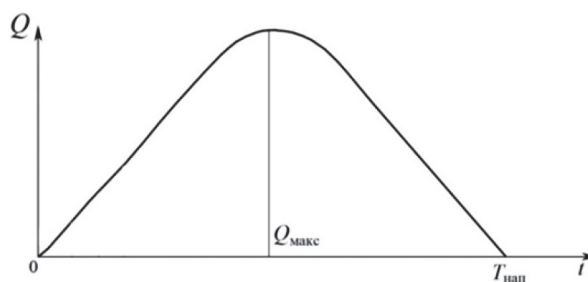


Рис. 2. График зависимости расхода от времени при наполнении камеры шлюза

В этот же период времени площадь живого сечения камеры наименьшая, так как уровень воды в ней соответствует уровню нижнего бьефа. Поэтому P_v имеет наибольшее значение в начальный период наполнения камеры при первом пробеге волны от верхней головы к нижней (первый пик).

Для анализа влияния изменения расхода на величину пика гидродинамической силы введем дополнительную характеристику — коэффициент приращения расхода, равный отношению положительного приращения расхода к его отрицательному приращению:

$$k_p = \left(\frac{dQ}{dt} \right)_{\text{пол}} : \left(\frac{dQ}{dt} \right)_{\text{отр}}.$$

Отрицательное приращение расхода на начальном этапе наполнения камеры может возникнуть в результате компенсации первого обратного пика гидродинамической силы путем как фиксации площади отверстия наполнения, так и его уменьшением.

При анализе влияния значения коэффициента приращения расхода на величину гидродинамического воздействия на судно были исследованы следующие области изменения коэффициента приращения расхода:

– первая область — результаты, полученные путем ограничения приращения расхода, поступающего в камеру шлюза, посредством кратковременного уменьшения площади сечения отверстия наполнения; при этом площадь уменьшается таким образом, что прирост расхода меньше его убывания, что характеризуется коэффициентом $k_p < 1$;

– вторая область — результаты, полученные путем ограничения приращения расхода, поступающего в камеру шлюза, посредством фиксации площади сечения отверстия наполнения; фиксация площади происходит исходя из условия, что скорость прироста расхода равна или больше скорости его убывания, что характеризуется коэффициентом $k_p \geq 1$;

– третья область — результаты, полученные для случая, когда площадь сечения отверстия наполнения медленно увеличивается; такой способ применяется при шлюзовании судна с его швартовкой к неподвижным рывам, коэффициент приращения k_p в этом случае не используется, так как убывания расхода на начальном этапе наполнения камеры шлюза не происходит.

Расчеты всех трех областей, результаты которых приведены на рис. 3, выполнялись с учетом следующих условий.

1. Величина первого пика прямой гидродинамической силы должна иметь максимально возможное значение при фиксированном положительном приращении поступающего расхода за минимально возможное общее время наполнения камеры шлюза.

2. Время изменения приращения расхода с положительного на отрицательное и обратно увязывается со скоростью распространения волн в камере шлюза. Компенсационная волна, создаваемая отрицательным приращением расхода с последующим его переходом в положительное приращение, должна встречаться с первой волной наполнения в середине длины корпуса судна.

В данном случае противоположно направленные волны компенсируют друг друга, изменяя уклон свободной поверхности воды в камере, что создает условия для отсутствия первого пика обратной гидродинамической силы. Эти условия ограничивают диапазон возможных величин положительного приращения расхода и временных промежутков, характерных как для положительных, так и для отрицательных приращений расхода. Как следствие, ограничиваются диапазоны возможных значений коэффициента приращения расхода.

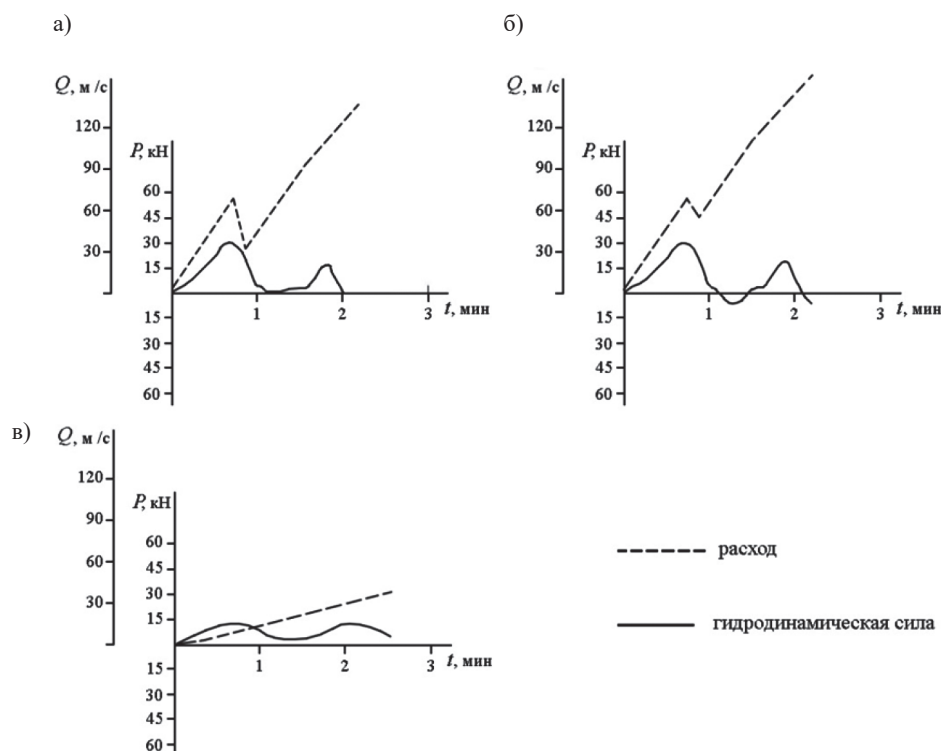


Рис. 3. Зависимости изменения гидродинамической силы от величины приращения расхода: а — при $k_p < 1$; б — при $k_p \geq 1$; в — при замедленном приращении расхода (без убывания расхода)

Зависимости приращения расхода Q , поступающего в камеру шлюза на начальном этапе ее наполнения, и гидродинамической силы P от времени (см. рис. 3) рассчитаны для судна водоизмещением $W = 60\,000$ кН. Анализ величин этих зависимостей позволяет сделать вывод о том, что при уменьшении площади отверстия наполнения первый пик прямой силы будет меньше, чем в обычном эксплуатационном случае (см. рис. 1). Это вызвано формированием встречной компенсационной волны (см. условие (2)). Дальнейшее увеличение площади отверстия и, соответственно, расхода поступающей жидкости не приводит к возникновению пиков гидродинамической силы, превышающих по величине первый пик.

Из графика рис. 3, *а* видно, что величина интенсивности положительного приращения расхода меньше, чем отрицательного ($k_p < 1$). Это обстоятельство с учетом временных параметров распространения волн в камере шлюза создает условия и возможность для формирования в камере компенсационной волны, сопоставимой по параметрам с первой волной пускa. Компенсационная волна встречается с первой волной пускa на участке камеры, соответствующем середине длины судна. После этого наступает промежуток времени, для которого характерным является постоянное значение гидродинамической силы (наличие на графике рис. 3, *а* плато перед началом второго пика гидродинамической силы). Далее следует увеличение гидродинамической силы при постоянном росте приращения расхода и формирование второго пика гидродинамической силы.

Анализ графика рис. 3, *б* показывает, что при недостаточной суммарной величине изменения отрицательного приращения расхода ($k_p \geq 1$) не возникают условия для создания компенсационной волны, которая по параметрам соответствовала бы волне первого пускa. Формирующаяся в этом случае компенсационная волна лишь частично уменьшает первую волну пускa, что приводит к наличию участка графика с обратной гидродинамической силой. Величина этой силы имеет меньшее значение по сравнению с наполнением камеры только при положительном приращении расхода (см. рис. 1), характерном для эксплуатационного случая, используемого на действующих шлюзах. Из анализа графика на рис. 3, *в* видно, что при замедленной величине приращения расхода (в несколько раз меньше, чем на рис. 3, *а, б*) обратные гидродинамические силы не возникают. Однако при этом продолжительность наполнения камеры становится слишком большой (такие режимы при шлюзовании практически не применяются).

На рис. 4 приведены результаты расчетов величины гидродинамической P силы в зависимости от коэффициента приращения расхода k_p для судов различного водоизмещения. На графике можно выделить две характерных области: положительных и отрицательных значений гидродинамической силы. Каждой области в зависимости от водоизмещения судна соответствуют определенные значения коэффициента приращения расхода. Точка перехода каждой кривой через горизонтальную ось графика из области положительных в область отрицательных значений силы определяет максимальное значение первого обратного пика гидродинамической силы, направленной в сторону верхней головы камеры шлюза. По мере увеличения значения коэффициента приращения расхода величина пикового значения обратной гидродинамической силы увеличивается. Однако, как видно из графиков, эта зависимость имеет убывающий характер и ее значение также зависит от расчетного водоизмещения судна.

При уменьшении значений коэффициента приращения расхода наблюдается переход гидродинамической силы через нулевые значения в область положительных значений силы, т. е. обратная гидродинамическая сила исчезает и происходит дальнейшее резкое увеличение положительных значений силы. Значения коэффициента приращения расхода, при которых наблюдаются положительные значения гидродинамической силы, возрастают при увеличении расчетного водоизмещения судна. Отсутствие результатов расчета коэффициента приращения расхода в области его малых значений (на участке, близком к нулю), связанное с ограничениями фактического изменения приращения расхода, вызвано особенностями конструктивных элементов системы наполнения и технологическими ограничениями работы оборудования шлюза.

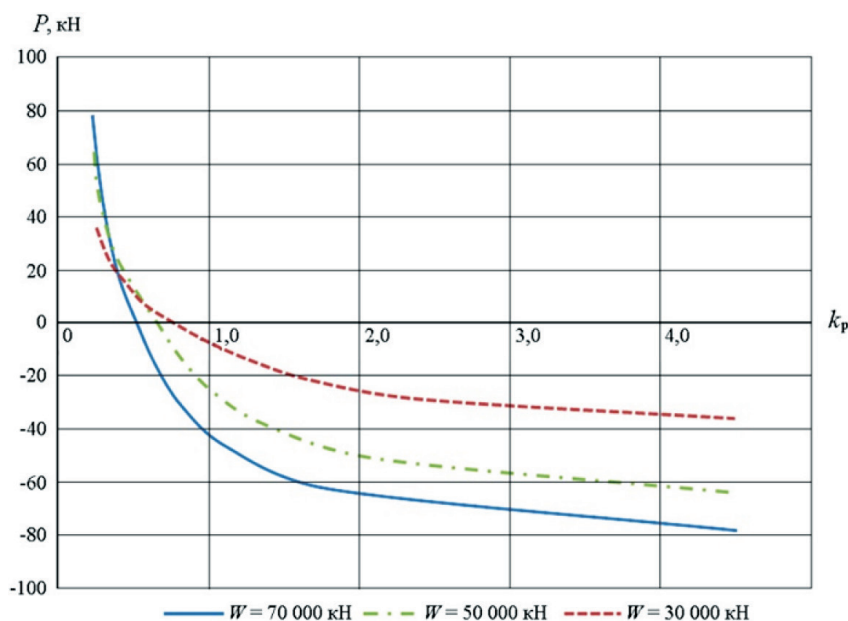


Рис. 4. Зависимость гидродинамической силы от коэффициента приращения расхода при различных значениях водоизмещения судна

Графики, приведенные на рис. 4, позволяют выполнить аналитическую оценку изменения максимальной величины первого обратного пика гидродинамической силы в зависимости от коэффициента приращения расхода, который показывает отношение положительного приращения расхода к отрицательному приращению расхода.

Обсуждение (Discussion)

Предлагаемый коэффициент приращения расхода k_p применим для анализа гидродинамического воздействия на шлюзующееся судно на начальном этапе наполнения камеры шлюза, когда при увеличении площади сечения отверстия наполнения расход стабильно увеличивается (см. рис. 2), т. е. имеет место положительное приращение расхода.

В зависимости от действующего напора и габаритов камеры продолжительность этого этапа может составлять 12–25 % от общего времени наполнения камеры шлюза. Эти оценки оставляют актуальным развитие дальнейших исследований по изучению компенсации обратных пиков гидродинамической силы на протяжении всего времени шлюзования.

Дальнейший интерес представляет проверка выполненных теоретических исследований на лабораторных или математических моделях для уточнения и сверки результатов теории и практики, а также верификации полученных результатов.

Заключение (Conclusion)

В результате проведенных теоретических исследований показана возможность компенсации первого обратного пика гидродинамической силы путем кратковременного изменения приращения расхода на отрицательный и последующего перехода в положительное приращение. Такой режим изменения приращения расхода синхронизирован со скоростями распространения волн в камере шлюза. Полученные результаты позволяют также корректировать в сторону уменьшения первый пик прямой гидродинамической силы.

Новый подход к постановке задачи позволяет направить исследования на улучшение условий стоянки судна при шлюзовании судов в режиме ограничений на использование штатных швартовых устройств шлюза. Такой подход может быть также использован как для действующего флота, так и для перспективного безэкипажного.

Продолжением исследований, выполненных в данной статье, является дальнейшее изучение возможностей компенсации обратных пиков гидродинамической силы на протяжении всего времени шлюзования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гапеев А. М. Системы питания судоходных шлюзов водой / А. М. Гапеев, В. В. Кононов // СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — 268 с.
2. Гапеев А. М. Гидравлические расчеты судоходных шлюзов / А. М. Гапеев, В. В. Кононов, К. П. Моргунов. — СПб.: Издательство «Лань», 2020. — 232 с. — EDN PYDRPK.
3. Головкин С. А. Распределение воды в судоходных шлюзах / С. А. Головкин, П. А. Гарибин, А. М. Гапеев. — СПб.: СПГУВК, 2009. — 153 с. — EDN QNWHID.
4. Кузнецов С. С. Обзор технических решений автошвартовых устройств на судоходных шлюзах / С. С. Кузнецов, Н. М. Ксенофонтов, А. А. Буцанец // Транспортное дело России. — 2024. — № 4. — С. 223–225. — EDN EJJGAF.
5. Гарибин П. А. Реновация систем наполнения водой камер судоходных шлюзов № 1-6 Водно-Балтийского водного пути / П. А. Гарибин, А. В. Богатов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 640–653. DOI: 10.21821/2309–5180–2020–12–4–640–653. — EDN LRPJZD.
6. Wu L. An Intelligent Monitoring System for the Force Characteristics of Floating Bollards in a Ship Lock / L. Wu, J. Yang, Z. Xiang, M. Liu, M. Li, Y. Di, H. Jiang, C. Dai, X. Ji // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11. — Is. 10. DOI: 10.3390/jmse11101948.
7. Hao Q. Responses of Large-ship Mooring Forces Based on Actual Measurement / Hao Q., Zhang J., Zhu X., Liu J. // J. Ship Mech. — 2021. — Vol. 25. — Pp. 1685–1698. DOI: 10.3969/j.issn.1007–7294.2021.12.009.
8. Liu M. Safety monitoring method for mooring lines of floating bollards in ship lock. / Liu M., Wang Z., Wu L., Li M., Yang J. // PortWaterw. Eng. — 2023. — Vol. 3. — Pp. 85–91. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002–4972.20230306.032.
9. Богатырев В. Г. Перспективы эксплуатации судоходного шлюза: как швартовать безэкипажные суда при шлюзовании / В. Г. Богатырев // Гидравлика и гидромеханика гидротехнических сооружений: сборник материалов научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Георгия Ивановича Мелконяна. Санкт-Петербург, 20 октября 2023 года. — СПб.: Изд-во Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова, 2023. — С. 116–123. — EDN CZSLCC.
10. Моргунов К. П. Обеспечение работы судопропускных сооружений при организации круглогодичной навигации на участке внутренних водных путей в направлении Каспий — Азов / К. П. Моргунов // Гидротехника. — 2022. — № 2(67). — С. 7–13. DOI: 10.55326/22278400_2022_2_7. — EDN XBYUHP.
11. Богатырев В. Г. Особенности реализации бесшвартового шлюзования при эксплуатации судоходного шлюза в условиях отрицательных температур / В. Г. Богатырев // Инновационные технологии и конструкции в гидротехническом, энергетическом и воднотранспортном строительстве: материалы 2-й Международной заочной научно-практической конференции в рамках Международного молодежного форума «Креатив и инновации 2023». Минск, 30 ноября 2023 года. — Минск: БНТУ, 2023. — С. 11–15.
12. Михайлов А. В. О неустановившемся движении воды в камере шлюзов / А. В. Михайлов // Сб. АН СССР. Гидравлика сооружений и динамика речных русел, 1959. — С. 42–68.
13. Володин А. Г. Расчет наполнения камеры шлюза методом Галеркина / А. Г. Володин // Тр. НИИВТ. Вопросы технической эксплуатации транспортных гидротехнических сооружений. — 1986. — С. 68–71.
14. Белкин В. Г. Применение метода Галеркина для потока в камере шлюза / В. Г. Белкин // Тр. НИИВТ. Вопросы гидравлического обоснования путевых работ на реках, 1989. — С. 87–94.

REFERENCES

1. Gapeev A. M. and V. V. Kononov. *Sistemy pitaniya sudohodnykh shlyuzov vodoj*. Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2013: 268.
2. Gapeev, A. M., V. V. Kononov and K. P. Morgunov. *Gidravlicheskie raschety sudokhodnykh shlyuzov* Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo "Lan", 2020: 232.

3. Golovkov, S. A., P. A. Garibin and A. M. Gapeev. *Raspredelenie vody v sudokhodnykh shlyuzakh* Sankt-Peterburg: SPGUVK, 2009: 153.
4. Kuznetsov, S. S., N. M. Ksenofontov and A. A. Butsanets. “Overview of technical solutions for mooring devices on shipping locks.” *Transport Business of Russia* 4 (2024): 223–225.
5. Garibin, P. A. and A. V. Bogatov. “Renovation of water filling systems for the chambers of shipping locks № 1–6 of the volga-baltic waterway.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 12.4 (2020): 640–653. DOI: 10.21821/2309–5180–2020–12–4–640–653.
6. Wu, L., X. Ji, et al. “An Intelligent Monitoring System for the Force Characteristics of Floating Bollards in a Ship Lock.” *Journal of Marine Science and Engineering* 11.10 (2023). DOI: 10.3390/jmse11101948.
7. Hao Q., Zhang J., Zhu X. and Liu J. “Responses of Large-ship Mooring Forces Based on Actual Measurement.” *J. Ship Mech* 25. (2021): 1685–1698. DOI:10.3969/j.issn.1007–7294.2021.12.009.
8. Liu M., Wang Z., Wu L., Li M., Yang J. “Safety monitoring method for mooring lines of floating bollards in ship lock.” *PortWaterw. Eng* 3. (2023): 85–91. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002–4972.20230306.032.
9. Bogatyrev, V. G. “Prospects for operating a shipping lock: how to moor unmanned vessels during locking.” *Gidravlika i gidromekhanika gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: Sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyaschennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya Melkonyana Georgiya Ivanovicha, Sankt-Peterburg, 20 oktyabrya 2023 goda*. Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova, 2023: 116–123.
10. Morgunov, K. P. “Ensuring the operation of navigation facilities in the organization of year-round navigation on the section of inland waterways in the direction of the caspian sea — azov.” *Gidrotekhnika* 2(67) (2022): 7–13. DOI: 10.55326/22278400_2022_2_7.
11. Bogatyrev V. G. “Osobennosti realizatsii besshvartovnogo shlyuzovaniya pri ekspluatatsii sudohodnogo shlyuza v usloviyakh otricatel’nykh temperature.” *Innovatsionnye tekhnologii i konstrukcii v gidrotekhnicheskoy, energeticheskoy i vodnotransportnoy stroitel’stve: Materialy 2-j Mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, v ramkah Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma «Kreativ i innovatsii 2023», Minsk, 30 noyabrya 2023 goda*. Minsk: BNTU, 2023: 11–15.
12. Mihajlov A. V. “O neustanovivshemsya dvizhenii vody v kamere shlyuzov” *Sb. AN SSSR. Gidravlika sooruzhenij i dinamika rechnykh rusel*. (1959): 42–68.
13. Volodin A. G. “Raschet napolneniya kamery shlyuza metodom Galerkina” *Tr. NIIVT. Voprosy tekhnicheskoy ekspluatatsii transportnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij*. (1986): 68–71.
14. Belkin V. G. “Primenenie metoda Galerkina dlya potoka v kamere shlyuza” *Tr. NIIVT. Voprosy gidravlicheskogo obosnovaniya putevykh rabot na rekah*. (1989): 87–94.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Моргунов Константин Петрович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: morgunovkp@gumrf.ru

Богатырев Владислав Григорьевич —

кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: Bogatyrevvg@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Morgunov, Konstantin P. —

PhD of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: morgunovkp@gumrf.ru

Bogatyrev Vladislav G. —

PhD of Technical Sciences
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: Bogatyrevvg@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 04 марта 2025 г.

Received: Mar. 4, 2025.