

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-993-1006

SIMULATION THE FILLING NAVIGATION LOCK CHAMBER PROCESS BY RESULTS OF FIELD OBSERVATIONS

G. G. Ryabov, A. N. Ushakevich, R. S. Smirnov

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

The article describes a technique for simulating the process of filling a navigation lock chamber. The mathematical model is built on the basis of data that can be obtained from existing navigable locks by performing field observations, or by measurements results on laboratory models. The composition of the raw data needed to build an adequate model, and the requirements for them.

The proposed model is based on the classical theory of performing hydraulic calculations of navigation locks. The principle of constructing the model is described using the example of a navigable sluice equipped with a head feeding system with filling from flat lifting and lowering gates, but this principle can also be applied in cases of simulating the operation of locks with other filling systems types. The main model function is the dependence of the coefficient of flow value on the height of the gate position. The coefficient of flow value depends on many factors characterizing the filling system of the gateway under consideration. Based on this relationship, the process of filling the lock chamber with the determination of the amount of forces acting on the ship under different conditions during the lockout can be performed.

As an example, we consider the sequence of modeling the process of filling the currently acting navigation lock chamber by the proposed method, with the analysis of the obtained results. The simulation purpose was to assess the compliance with the safety requirements of the vessel's parking conditions in the navigable lock chamber during the locking in specific conditions.

The proposed methodology is relevant for assessing the currently used modes of filling the chambers of operating locks, since the recent trend of increasing the ships displacement factor of the river fleet, requires the actualization of the previously laid parameters of the navigation locks.

Keywords: navigation lock, hydraulic estimation, filling system, coefficient of flow, laboratory tests, field observations.

For citation:

Ryabov, Georgiy G., Alexandr N. Ushakevich, and Ruslan S. Smirnov. "Simulation the filling navigation lock chamber process by results of field observations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 9.5 (2017): 993–1006. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-993-1006.

УДК (626.4:626.421.4)001.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАПОЛНЕНИЯ КАМЕРЫ СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА С УЧЕТОМ ДАННЫХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Г. Г. Рябов, А. Н. Ушакевич, Р. С. Смирнов

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

В статье описана методика моделирования процесса наполнения камеры судоходного шлюза. Математическая модель строится на основании данных, которые могут быть получены на существующих судоходных шлюзах при выполнении натуральных наблюдений или выполнении измерений на лабораторных моделях. Приводятся состав исходных данных, необходимых для создания адекватной модели, и требования, предъявляемые к ним.

Предложенная модель основана на классической теории выполнения гидравлических расчетов судоходных шлюзов. Принцип построения модели описывается на примере судоходного шлюза, оборудованного головной системой питания с наполнением из-под плоских подъемно-опускных ворот, однако этот принцип также может быть применен и в случаях моделирования работы шлюзов с другими системами питания. Основной модельной функцией является зависимость величины коэффициента расхода воды от высоты положения затвора, характер которой определяется множеством параметров системы наполнения расма-

триваемого шлюза. На основании этой зависимости может выполняться анализ процесса наполнения камеры шлюза с определением величины сил, действующих на судно во время шлюзования при различных условиях.

В качестве примера рассматривается последовательность моделирования процесса наполнения камеры действующего судоходного шлюза по предложенной методике с последующим анализом полученных результатов. Целью выполненного моделирования являлась оценка соответствия требованиям безопасности условий стоянки судна в камере судоходного шлюза во время шлюзования в конкретных условиях.

Предложенная методика является актуальной для оценки используемых в настоящее время режимов наполнения камер действующих шлюзов, поскольку наблюдающаяся в последнее время тенденция увеличения водоизмещения судов речного флота требует актуализации заложенных ранее параметров работы судоходных шлюзов.

Ключевые слова: судоходный шлюз, гидравлический расчет, система питания шлюза, коэффициент расхода, лабораторные исследования, натурные наблюдения.

Для цитирования:

Рябов Г. Г. Моделирование процесса наполнения камеры судоходного шлюза с учетом данных натурных наблюдений / Г. Г. Рябов, А. Н. Ушакевич, Р. С. Смирнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 993–1006. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-993-1006.

Введение (Introduction)

Процесс наполнения камеры судоходного шлюза является наиболее ответственным этапом шлюзования и составляет около 1/3 всего времени, затрачиваемого на судопропуск при прохождении гидротехнических сооружений судами из нижнего бьефа в верхний. Критерием качественной работы системы питания шлюза является обеспечение нормативных условий стоянки судна при минимальных временных затратах, которые во многом зависят от режима открытия водопропускных отверстий и преимущественно определяются водоизмещением расчетных судов.

Поиск оптимального режима наполнения осуществляется путем гидравлических расчетов условий стоянки судна в камере с использованием имеющихся методик [1] – [6], которые зачастую не учитывают и не способны учитывать особенности каждого шлюза. К таким особенностям, в первую очередь, относится геометрия системы подачи воды (конфигурация затворов наполнения, очертания элементов, образующих водопропускные отверстия, состав гасительных устройств), которая является определяющей при выполнении подобного рода расчетов. Так, например, представленные на рис. 1 схемы порогов верхней головы шлюза для существующих методик являются абсолютно одинаковыми, хотя гидравлические сопротивления водопропускных отверстий могут варьироваться в широком диапазоне. Использование для трех различных схем порогов одинаковых справочных данных может привести к значительному искажению поступающего расхода воды в камеру, изменению уровня воды в процессе наполнения, величине усилий в швартовных связях и др., что, в конечном итоге, может привести как к аварийной ситуации на сооружении, так и к увеличению времени судопропуска.

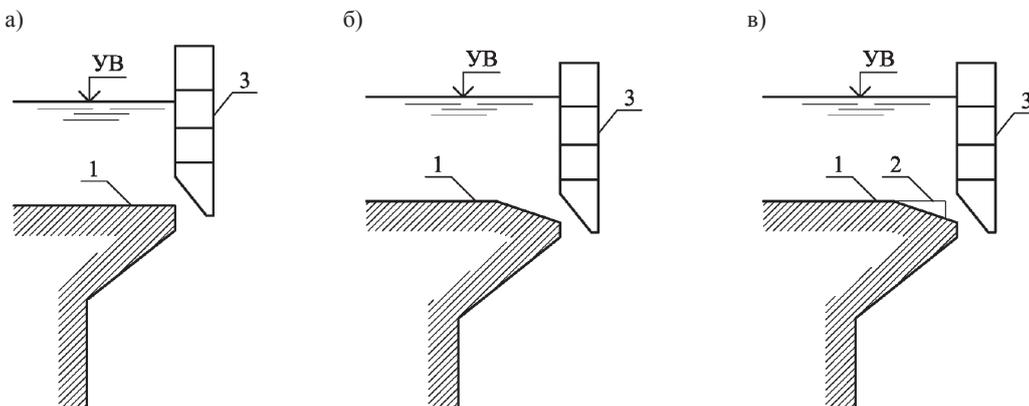


Рис. 1. Разновидности порогов верхней головы судоходного шлюза:

а — без скоса; б — со скошенной гранью; в — с разделительными бычками;

1 — порог; 2 — разделительные бычки; 3 — верхние основные ворота (затвор наполнения)

Конечно, использование приблизительных значений коэффициента расхода водопропускных отверстий является вполне оправданным для проектирования новых уникальных систем питания шлюзов на стадии предпроектной проработки, однако оказывается в значительной степени ошибочным на стадии проекта и при выполнении поверочных расчетов.

Авторы статьи предлагают методику, позволяющую осуществлять корректный гидравлический расчет системы наполнения и расчет условий стоянки шлюзуемого судна, при этом могут быть использованы результаты как натурных исследований, так и физического моделирования в лабораторных условиях.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для построения адекватной математической модели должны выполняться следующие условия [7]:

1. *Полнота идентификации* — количество используемых в модели параметров должно быть достаточным для получения необходимой информации.
2. *Точность* — математическая логика модели должна обеспечивать соответствие величин моделируемых параметров, получаемых в результате моделирования, натурным данным.
3. *Непротиворечивость* — характер изменения величин моделируемых параметров, полученных с помощью математической логики, должен совпадать с характером изменений соответствующих параметров реальных процессов.

Адекватность модели обусловлена не только ее внутренней логикой, но и требованиями, предъявляемыми к исходным данным. Таким образом, важным этапом моделирования является получение данных об исследуемом судоходном шлюзе с учетом особенностей конструкции системы наполнения. Такие данные зачастую могут быть получены из паспорта сооружения, однако в некоторых случаях (например, при эксплуатационных изменениях конструктивных элементов или их деформаций в случае нештатных ситуаций) исходные данные должны быть получены в результате непосредственных натурных измерений.

Наряду с требованиями адекватности, к математической модели предъявляются требования универсальности. Универсальность модели характеризуется ее способностью учитывать особенности достаточно обширного ряда процессов. Требования универсальности в некоторой степени противоречат требованиям полноты идентификации, однако в ряде случаев такие противоречия можно исключить за счет изменения состава исходных данных модели.

Универсальность предлагаемой модели обеспечивается благодаря использованию интегрального показателя, характеризующего сопротивление водопропускных отверстий, — коэффициента расхода системы, получаемого в результате натурных или лабораторных исследований. Такой подход гарантирует высокую степень точности результата при одновременном учете особенностей конструкции и характера процессов, происходящих в исследуемом судоходном шлюзе.

Использование экспериментальных данных в рассматриваемой модели вызывает необходимость также предъявлять и требования достоверности. Достоверность исходных данных может быть оценена с использованием теории вычисления погрешностей для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ [8] по критерию Стьюдента на основании анализа нескольких рядов данных результатов измерений. Значения, выходящие за пределы границ доверительного интервала, отбраковываются.

Структура предлагаемой модели наполнения камеры судоходного шлюза может быть рассмотрена на примере судоходного шлюза с головной системой наполнения из-под плоских подъемно-опускных ворот. Такая конкретизация обусловлена необходимостью лаконичного изложения материала, однако предложенные зависимости в равной степени применимы для моделей наполнения шлюзов с другими типами систем питания.

Исходными данными для модели наполнения камеры судоходного шлюза являются следующие параметры и зависимости:

- габаритные размеры камеры судоходного шлюза;
- зависимость изменения уровня воды в камере шлюза во времени $y = f(t)$;

– зависимость изменения во времени степени открытия регулирующих устройств системы наполнения $h_{o,v} = f(t)$ (в шлюзах с головной системой наполнения из-под плоских подъемно-опускных ворот в качестве регулирующего устройства выступает плоский затвор, степень открытия которого определяется высотой его положения относительно порога).

Гидравлические характеристики системы наполнения судоходного шлюза могут быть получены в результате совместного решения уравнения для истечения из отверстий:

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gh} \quad (1)$$

и уравнения неразрывности:

$$-\frac{dh}{dt} = \frac{Q}{\Omega}, \quad (2)$$

где μ — коэффициент расхода водопропускного отверстия;

ω — площадь водопропускного отверстия;

h — расчетный напор воды, действующий на проточный тракт системы наполнения;

dh — уменьшение напора воды в камере шлюза за время dt ;

Ω — площадь зеркала камеры шлюза.

Коэффициент расхода μ является основным параметром предлагаемой модели наполнения камеры судоходного шлюза. Гидравлическая характеристика $\mu = f(t)$, представляющая собой изменение во времени величины коэффициента расхода, определяется следующими факторами:

- тип системы питания судоходного шлюза;
- очертания водопроводного тракта, образованного регулируемыми устройствами системы наполнения;
- режим открытия регулирующих устройств системы наполнения, описываемый зависимостью $h_{o,v} = f(t)$, задаваемой в качестве исходных данных;
- кинематическая структура потока воды, поступающего в камеру судоходного шлюза.

Таким образом, гидравлическая характеристика $\mu = f(t)$ в скрытом виде содержит все особенности исследуемой конструкции системы наполнения камеры судоходного шлюза. Эту гидравлическую характеристику можно получить на основании натуральных измерений, выражая величину коэффициента расхода из зависимости (1). Для этого необходимо использовать гидравлические характеристики $h = f(t)$ и $Q = f(t)$, которые могут быть построены по измеренным в натуре величинам уровня воды в камере y .

Для получения зависимостей $h = f(t)$ и $Q = f(t)$ сначала по данным натуральных измерений строится кривая изменения уровня воды в камере шлюза в процессе наполнения $y = f(t)$, которая затем разбивается на некоторое число промежутков времени Δt , в каждом из которых определяется среднее значение уровня воды y и величина изменения уровня воды Δy (рис. 2).

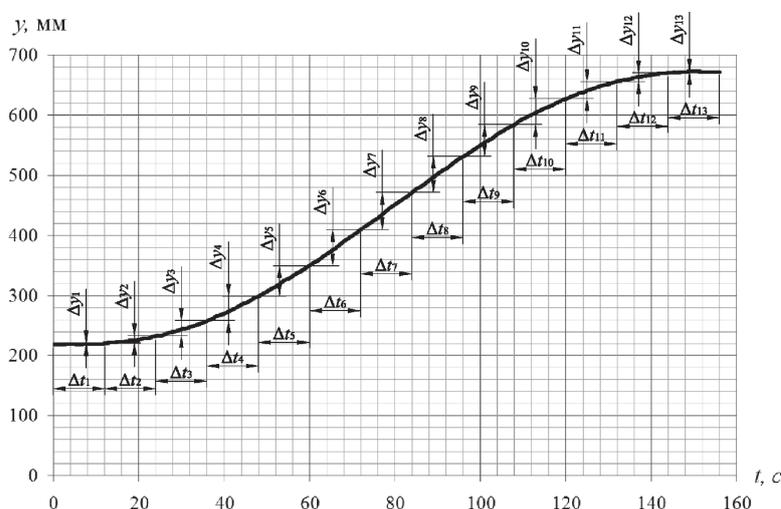


Рис. 2. Схема к определению зависимости $Q = f(t)$

Гидравлическая характеристика $h = f(t)$ представляет собой зависимость изменения во времени напора воды, действующего на камеру шлюза. Она может быть построена по выражению

$$h = H_d - \sum \Delta y, \quad (3)$$

где H_d — начальный напор на камеру шлюза.

Гидравлическая характеристика $Q = f(t)$, представляющая собой зависимость изменения во времени расхода воды, поступающего в камеру шлюза, может быть построена по выражению

$$Q = \frac{\Delta y}{\Delta t} \Omega. \quad (4)$$

Полученные характеристики используются для вычисления фактического коэффициента расхода по выражению (1), при этом рассматриваются два расчетных промежутка:

- свободное истечение потока воды в атмосферу при уровне воды в камере ниже центра тяжести водопропускного отверстия (рис. 3, а);
- напорное истечение из отверстия под уровень воды в камере шлюза (рис. 3, б).

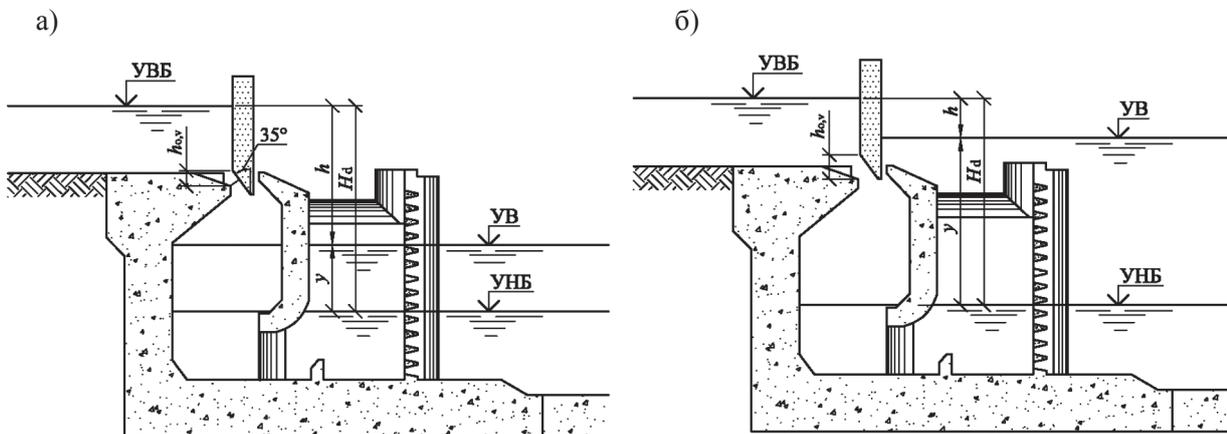


Рис. 3. Характерные условия истечения воды из-под плоских подъемно-опускных ворот:

а — истечение в атмосферу; б — истечение под уровень воды

Условные обозначения: УВБ и УНБ — уровни воды в верхнем и нижнем бьефах соответственно

В течение первого расчетного промежутка величина h принимается равной напору над центром тяжести отверстия $h_{цт}$, образованного подъемно-опускными воротами и кромкой порога шлюза. Величину $h_{цт}$ с учетом положения ворот в рассматриваемый момент времени можно вычислить по зависимости

$$h = h_{цт} = h_{l,h} + p_1 - \frac{h_{o,v} - h_0}{2}, \quad (5)$$

где $h_{l,h}$ — глубина на пороге верхней головы;

p_1 — высота скоса порога;

$h_{o,v}$ — высота подъема верхних основных ворот с момента начала движения;

h_0 — величина холостого хода ворот верхней головы (высота поднятия ворот, при которой не происходит открытия водопропускного отверстия), $h_0 \approx 0,15 - 0,25$ м.

В течение второго промежутка, при напорном истечении, когда уровень воды в камере шлюза достигает центра тяжести водопропускного отверстия, в качестве h используется общий напор как разница отметок уровней воды верхнего бьефа и уровня в камере шлюза или (что то же самое) разница между начальным напором H_d и уровнем воды в камере y , отсчитываемым от отметки нижнего бьефа (см. рис. 3, б):

$$h = H_d - y. \quad (6)$$

Основой для построения модели наполнения камеры шлюза является зависимость изменения величины коэффициента расхода от высоты подъема ворот верхней головы $\mu = f(h_{o,v})$. Эту зависимость можно построить по гидравлическим характеристикам $\mu = f(t)$ и $h_{o,v} = f(t)$, выполнив сопоставление их значений для выбранных моментов времени. Зависимость $\mu = f(h_{o,v})$ можно рассматривать как инвариант относительно режимов маневрирования регулирующими устройствами системы наполнения и величины изменения уровня воды в камере рассматриваемого шлюза. Это позволяет создать модель процесса наполнения и выполнить его анализ в различных условиях.

Для оценки условий стоянки судна в камере в процессе шлюзования можно использовать величину первого пика гидродинамической силы [1], а также величину усилия, возникающего в швартовной связи. Величина первого пика гидродинамической силы может быть определена по зависимости

$$P_1 = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \frac{WD}{g(\Omega_n - \omega_s)}, \quad (7)$$

где $\Delta Q/\Delta t$ — приращение расхода воды в начальный момент времени;

W — водоизмещение расчетного судна;

D — коэффициент, учитывающий положение судна в камере шлюза для судна, расположенного у верхней головы, $D = 1,4$;

Ω_n — площадь живого сечения камеры шлюза при уровне нижнего бьефа;

ω_s — площадь погруженной части расчетного судна по мидель-шпангоуту.

Величина усилия в швартовной связи определяется по зависимости

$$S = \frac{P_1}{\cos \alpha}, \quad (8)$$

где α — угол между осью шлюза и направлением швартовной связи (обычно находится в диапазоне $20 - 40^\circ$, хотя может изменяться и в более широких пределах, вплоть до $70 - 80^\circ$).

Для получения более полной информации об условиях стоянки судна в камере шлюза в процессе шлюзования может применяться методика численного интегрирования системы дифференциальных уравнений [3] – [6], [9] – [11], состоящей из уравнений движения, дополненных уравнением неразрывности и уравнениями движения центра масс расчетного судна. В случае одномерной постановки задачи в неподвижной системе координат (рис. 4) данная система уравнений имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{u|u|}{C^2 R} = 0; \\ \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{Q}{b_c}; \\ -M \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + P_x - P_{x,шв1} + P_{x,шв2} = 0; \\ -(M + \Delta M) \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - N_z \frac{\partial z_c}{\partial t} - \rho g W + P_z - \Delta M (x_c - x_m) \frac{\partial^2 \psi_c}{\partial t^2} + P_{z,шв1} + P_{z,шв2} = 0; \\ -(I + \Delta I) \frac{\partial^2 \psi_c}{\partial t^2} - N_\psi \frac{\partial \psi_c}{\partial t} + L - P_{x,шв1} a_1^* + P_{x,шв2} a_2^* - \Delta M (x_c - x_m) \frac{\partial^2 z_c}{\partial t^2} + \\ + P_{z,шв1} (x_c - x_{шв1}) - P_{z,шв2} (x_{шв2} - x_c) = 0, \end{array} \right. \quad (9)$$

где u — средняя скорость течения воды в живом сечении;

C — коэффициент Шези;

- R — гидравлический радиус;
 M — масса судна;
 ΔM — присоединенная масса воды;
 b_c — ширина камеры судоходного шлюза;
 Q — расход воды, поступающий через водопропускное отверстие;
 t — переменная времени;
 W — объемное водоизмещение судна на спокойной воде;
 x_c, z_c — соответственно продольная и поперечная координаты центра тяжести судна;
 x_m — продольная координата положения мидель-шпангоута судна;
 P_x, P_z — соответственно продольная и вертикальная составляющие результирующего вектора сил, действующих на судно в процессе наполнения камеры шлюза;
 $P_{x,шв1}, P_{x,шв2}$ — соответственно горизонтальные составляющие усилия в швартовных связях;
 $P_{z,шв1}, P_{z,шв2}$ — вертикальные составляющие усилия в швартовных связях;
 ψ_c — угол продольного наклона основной плоскости судна относительно горизонта;
 I — момент инерции судна относительно горизонтальной поперечной оси, проходящей через центр тяжести судна;
 ΔI — присоединенный момент инерции судна относительно горизонтальной поперечной оси, проходящей через центр тяжести судна;
 N_ψ — коэффициент сопротивления воды продольным угловым колебаниям судна;
 L — момент вектора сил, действующих на судно со стороны жидкости в камере, относительно оси, проходящей через центр тяжести судна;
 $x_{шв1}, x_{шв2}$ — продольные координаты швартовных связей;
 a_1^*, a_2^* — плечи сил $P_{x,шв1}$ и $P_{x,шв2}$ соответственно.

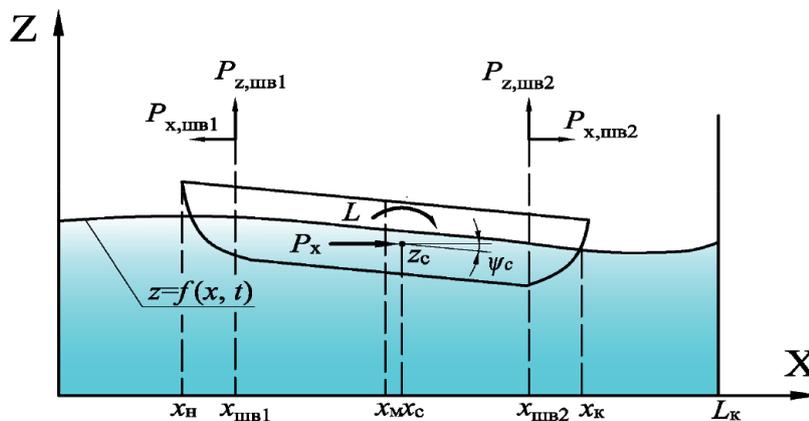


Рис. 4. Расчетная схема колебательного движения одиночного судна в камере в процессе наполнения

Решение представленной системы реализовано в апробированной программе Wave [9], [12], разработанной специалистами Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций [4].

Результаты (Results)

В качестве примера применения представленной методики был рассмотрен шлюз № 6 Волго-Балтийского канала. На первом этапе исследований была выполнена серия измерений положения уровней воды (в верхнем бьефе и камере) и ворот верхней головы во время наполнения камеры. По результатам измерений были построены гидравлические характеристики системы наполнения (рис. 5).

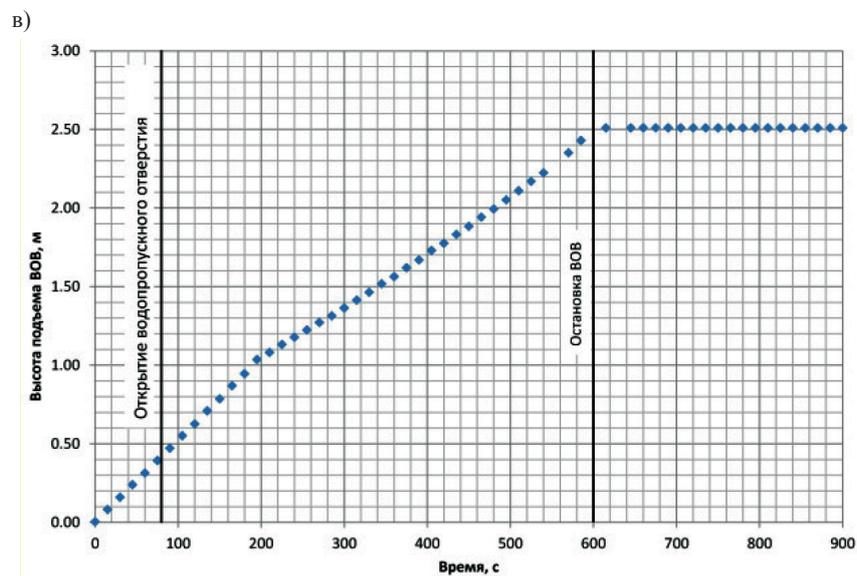
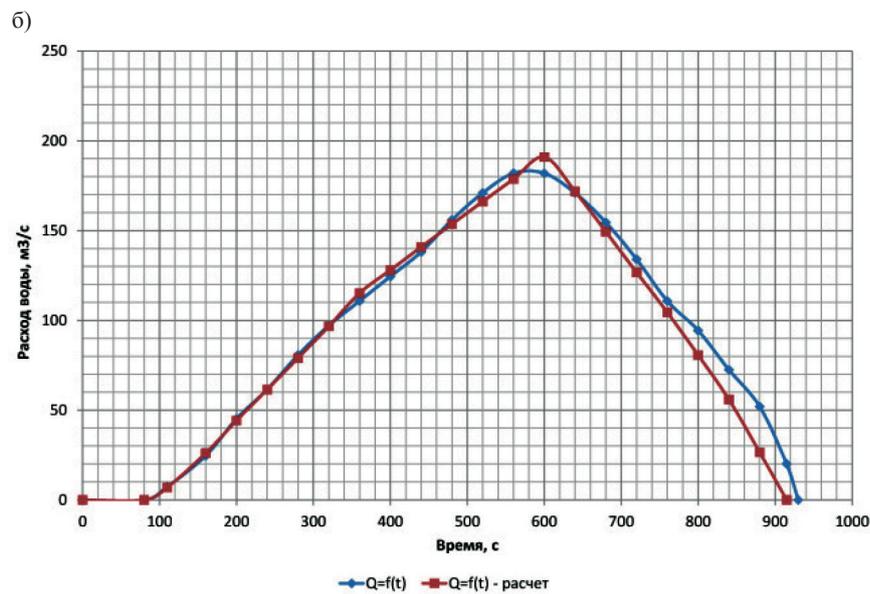
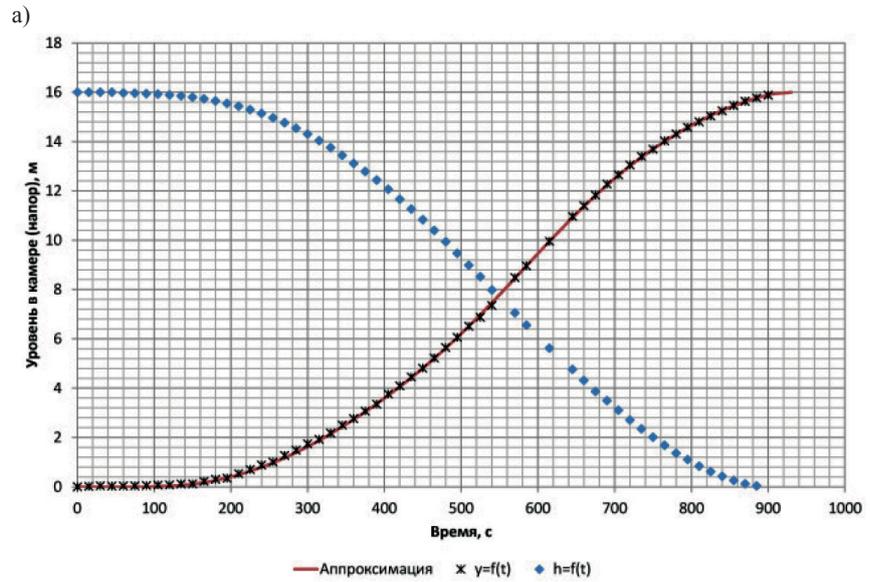


Рис. 5. Изменение напора воды (а), расхода воды (б) и высоты ворот (в) в процессе наполнения камеры шлюза

На основании представленных гидравлических характеристик по выражению (1) была получена зависимость $\mu = f(h_{o,v})$, график которой дан на рис. 6.

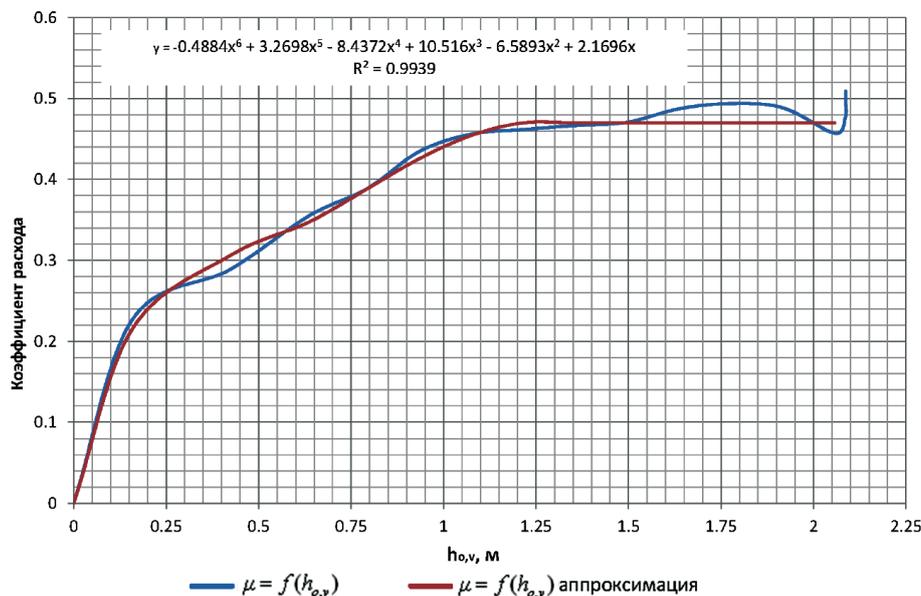


Рис. 6. График зависимости $\mu = f(h_{o,v})$

Верификация подобранной аппроксимирующей зависимости осуществлялась путем сопоставления натурной кривой расхода воды и расчетной (см. рис. 5, б), полученной с использованием следующей функции:

$$\begin{cases} \mu = 2,1696h_{o,v} - 6,5893h_{o,v}^2 + 10,516h_{o,v}^3 - 8,4372h_{o,v}^4 + \\ + 3,2698h_{o,v}^5 - 0,4884h_{o,v}^6 & \text{при } h_{o,v} < 1,2 \text{ м;} \\ \mu = 0,47 & \text{при } h_{o,v} \geq 1,2 \text{ м.} \end{cases} \quad (10)$$

Как видно, теоретическая кривая расхода воды несколько отличается от натурной, однако имеющиеся расхождения, во-первых, незначительны, а, во-вторых, преобладают во второй половине времени процесса наполнения камеры шлюза, когда влияние величины расхода воды на гидродинамическую силу оказывается минимальным.

Определение первого пика продольной гидродинамической силы осуществлялась по выражению (7) для расчетного судна «Балт Флот 2» пр. RST54 при осадке 3,4 м водоизмещением 73020 кН, которая составила 56,6 кН. При этом величина коэффициента D принималась равной 1,4, а площадь миделевого сечения судна — $\omega_s = 56,8 \text{ м}^2$.

Аналитический график изменения величины гидродинамической силы (рис. 7), действующей на судно в течение процесса наполнения камеры шлюза, был получен в результате численного решения системы уравнений (10) с помощью программы Wave. Максимальное значение вычисленной таким образом величины гидродинамической силы составляет $P = 47,5 \text{ кН}$.

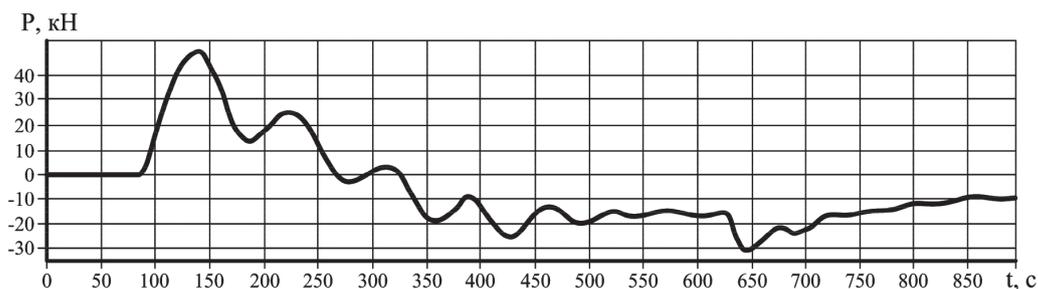


Рис. 7. Продольная гидродинамическая сила, действующая на судно пр. RST54 по результатам расчета в программе Wave

Оценка условий стоянки расчетного судна в камере рассматриваемого шлюза была выполнена по величине гидродинамической силы $P = 56,6$ кН, вычисленной по выражению (7), принятой на основании выбора самого неблагоприятного результата. Согласно «Правилам классификации и постройки судов внутреннего плавания» [13], минимальное разрывное усилие швартовного каната F_p определяется по следующему выражению:

$$F_p = 171 + 3,92 \cdot 0,01(N_c - 1000), \quad (11)$$

где N_c — характеристика снабжения судна, вычисляемая по зависимости

$$N_c = L(B + H) + k \sum_{i=1}^n l_i h_i, \quad (12)$$

где L — конструктивная длина судна, $L = 140,85$ м;

B — конструктивная ширина судна, $B = 16,7$ м;

H — высота борта судна, $H = 5,0$ м;

$k \sum_{i=1}^n l_i h_i$ — слагаемое, учитывающее особенности надстройки судна.

В соответствии с выражением (11) минимальное разрывное усилие используемого швартовного каната на судне пр. RST54 должно составлять 251 кН. Величина максимального усилия в швартовной связи, вычисленная по выражению (8) для самого неблагоприятного случая (при величине угла между направлением оси шлюза и швартовной связи $\alpha = 40^\circ$), составляет всего 81,4 кН, т. е. прочность швартовного каната обеспечивается.

Необходимо отметить также, что учитывая широкий диапазон реального изменения угла заведения швартова, усилие также может изменяться в широких пределах. Так, при 70° величина усилия в канате может достигнуть 182 кН, что вполне соизмеримо с разрывным усилием.

Обсуждение (Discussion)

Оценка предлагаемого метода осуществлялась путем сопоставления результатов расчета с данными, полученными на основе используемой в настоящий момент методики [1], [2], к особенностям которой можно отнести установление постоянного в течение всего процесса наполнения коэффициента расхода, который принимается равным в диапазоне от 0,6 до 0,7, и принятие расчетного сечения водопропускного отверстия $h_{o,n}$, нормальным к козырьку ворот. Корреляция между величиной подъема ворот и высотой отверстия осуществляется через угол α (рис. 8):

$$h_{o,n} = h_{o,v} \sin \alpha. \quad (13)$$

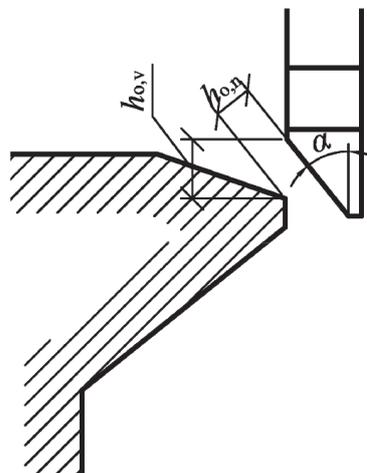


Рис. 8. Расчетные сечения водопропускного отверстия системы наполнения из-под плоских подъемно-опускных ворот

Совместное отображение натурной и теоретических кривых $Q = f(t)$ представлено на рис. 9. Графики, полученные по действующим методикам, соответствуют граничным величинам предлагаемых коэффициентов расхода и наглядно показывают разброс получаемых результатов в зависимости от субъективного решения расчетчика.

Первичный анализ полученных кривых может быть осуществлен по величине интегральной относительной погрешности, расчет которой применительно ко всему процессу наполнения осуществляется по следующей зависимости:

$$\delta = \frac{\sum |Q_i' - Q_i''| \Delta t_i}{\bar{Q}_i \sum \Delta t_i}, \quad (14)$$

где Q_i' и Q_i'' — средние величины расхода натурной и теоретической кривых в интервале времени Δt_i ;

\bar{Q}_i — среднее значение между Q_i' и Q_i'' .

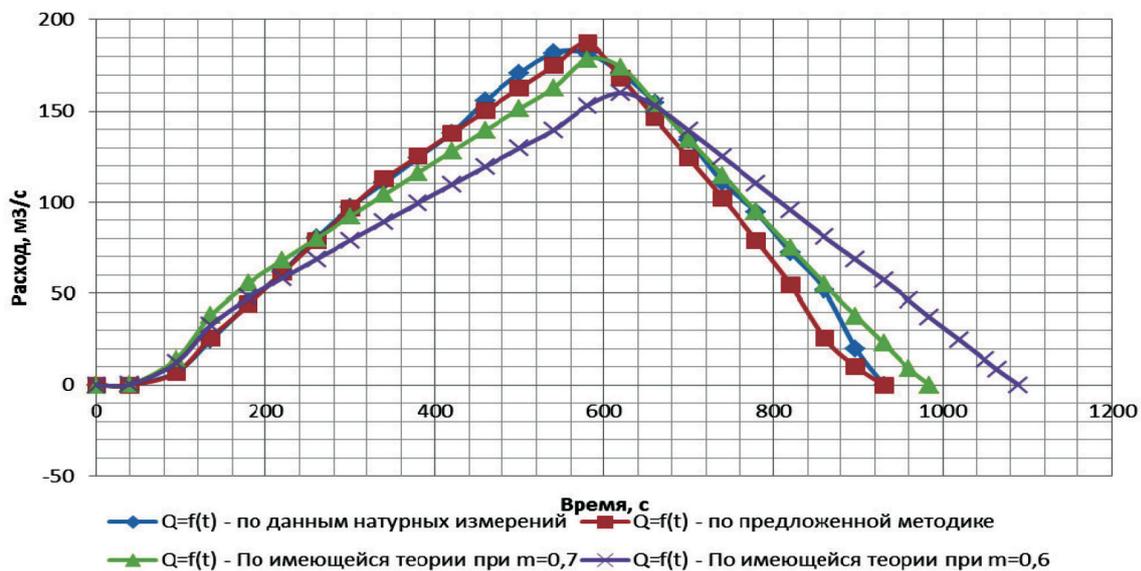


Рис. 9. Совместное отображение кривых $Q = f(t)$, полученных по различным методикам

В качестве основного показателя, отражающего меру качества регрессионной модели, устанавливающей связь между зависимой и независимыми переменными, обычно используется коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2}, \quad (15)$$

где σ — дисперсия случайной ошибки модели;

σ_y^2 — дисперсия зависимой величины, описываемой в модели.

Для выборочной оценки качества модели по ряду значений величину коэффициента детерминации можно определить по зависимости

$$R^2 = 1 - \frac{S_{res}}{S_{tot}}, \quad (16)$$

где S_{res} — сумма квадратов остатков регрессии,

$$S_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i\text{расч}})^2, \quad (17)$$

y_i — фактические значения переменной модели (натурные данные);

$y_{i \text{ расч}}$ — расчетные значения переменной модели;

S_{tot} — общая сумма квадратов,

$$S_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{\text{сред}})^2; \quad (18)$$

$y_{\text{сред}}$ — среднее арифметическое переменной модели (по натурным данным) в рассматриваемом диапазоне выборки (по всему процессу наполнения).

Чем ближе величина R^2 к единице, тем в большей степени рассматриваемая модель соответствует натурным данным.

Результаты расчетов и отклонение в % от данных натурных измерений представлены в таблице, где сила для натурных измерений определена теоретически по зависимости (7) с использованием натурального гидрографа.

Сравнение результатов расчетов по различным методикам с натурными данными

Наименование показателя	Различные способы моделирования			
	Натурные измерения	По предлагаемой методике	По имеющейся методике при $\mu = 0,7$	По имеющейся методике при $\mu = 0,6$
Относительная погрешность для кривой $Q = f(t)$	—	$\frac{10,9}{-}$	$\frac{20,6}{-}$	$\frac{48,2}{-}$
Коэффициент детерминации для кривой $Q = f(t)$	—	$\frac{0,99}{-}$	$\frac{0,98}{-}$	$\frac{0,84}{-}$
Первый пик гидродинамической силы, действующей на судно, кН	$\frac{52,9}{-}$	$\frac{56,6}{6,9}$	$\frac{79,0}{46,2}$	$\frac{67,7}{18,8}$
Время наполнения, с	$\frac{930}{-}$	$\frac{915}{1,6}$	$\frac{985}{6,0}$	$\frac{1090}{16,2}$
Максимальное значение $Q = f(t)$	$\frac{182}{-}$	$\frac{187}{2,7}$	$\frac{179}{1,6}$	$\frac{153}{16,2}$

Заключение (Conclusion)

Заложенные в основу предлагаемого метода принципы моделирования априори дают наилучший результат, поскольку, по сути, близки к верификации известной математической модели по результатам натурных наблюдений. Учитывая, что натурные графики процесса наполнения имеются на каждом шлюзе в его паспорте, провести такую верификацию не составляет никакой сложности.

Как показывают сопоставительные расчеты, моделирование по предлагаемой методике исключает грубые ошибки, которые могут быть допущены расчетчиком при назначении граничных величин отдельных коэффициентов (в данном случае это коэффициент расхода воды) из предлагаемого той или иной методики диапазона. Так, например, коэффициент детерминации для функции $Q = f(t)$, в зависимости от субъективного мнения расчетчика, применительно к рассматриваемой задаче может варьироваться от 0,84 до 0,98, а относительная погрешность — в пределах от 20,6 до 48,2 %.

В завершение следует отметить, что даже если расчетчик из заданного диапазона (случайным образом) примет значение, наиболее близкое к натурным данным, то он все равно получит менее точные по сравнению с предлагаемой методикой результаты. Таким образом, констатируя преимущество предлагаемого метода, можно рекомендовать его использование при проектирова-

нии новых сооружений, основываясь на данных шлюзов-аналогов, а также при выполнении поверочных гидравлических расчетов существующих шлюзов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов А. В. Головные системы питания судоходных шлюзов и их расчет / А. В. Михайлов. — М.: Минречфлот СССР, 1951. — 172 с.
2. Гапеев А. М. Совершенствование эксплуатационных качеств судоходных шлюзов с головной системой питания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. М. Гапеев. — СПб.: СПГУВК, 1999. — 42 с.
3. Атавин А. А. Гидродинамические аспекты нештатных и аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях: монография / А. А. Атавин, В. И. Букреев, О. Ф. Васильев [и др.]; под ред. д-ра техн. наук, проф. В. В. Дегтярева (мл.). — Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2009. — 327 с.
4. Лавриновский М. С. Численные методы решения системы уравнений совместных колебаний воды и толкаемого состава в камере судоходного шлюза / М. С. Лавриновский // Научно-методическая конференция: тез докл. — СПб.: СПГУВК, 1998. — Ч. 2. — С. 148.
5. Васильев О. Ф. Приближенные дифференциальные уравнения колебаний воды в судовозных камерах наклонных судоподъемников и камерах шлюзов с сосредоточенными системами наполнения / О. Ф. Васильев // Научные доклады высшей школы. Сер.: «Строительство». — 1958. — № 2. — С. 243–251.
6. Васильев О. Ф. Присоединенная масса жидкости для судна, совершающего колебания в камере судоходного сооружения / О. Ф. Васильев // Прикладная механика и теоретическая физика. — 1961. — № 3. — С. 61–71.
7. Кубланов М. С. Проверка адекватности математических моделей / М. С. Кубланов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. — 2015. — № 211(1). — С. 29–36.
8. Чепуренко В. Г. Вычисление погрешностей измерений / В. Г. Чепуренко, В. Г. Нижник, Н. И. Соколова. — Киев: Выща шк., 1978. — 40 с.
9. Webb J. Innovations in Lock Filling and Emptying Systems / J. Webb, W. Peng // Paper 5 of PIANC Workshop. — 2009. — Pp. 15–16.
10. Wang H. Numerical prediction of hydrodynamic forces on a ship passing through a lock / H. Wang, Z. Zou // China Ocean Engineering. — 2014. — Vol. 28. — Is. 3. — Pp. 421–432. DOI 10.1007/s13344-014-0034-3.
11. Wang H. Z. Behaviours of a Ship Passing through a Lock under the Influence of a Berthed Ship / H. Z. Wang, Z. J. Zou // International Workshop on Next Generation Nautical Traffic Models. — Delft, The Netherlands, 2013.
12. Рябов Г. Г. Определение параметров системы наполнения судоходного шлюза с дополнительным пуском воды поверх ворот: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. Г. Рябов. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 18 с.
13. Правила классификации и постройки судов. — М.: Российский речной регистр, 2015. — Т. 3. — Ч. V. Судовые устройства и снабжение.

REFERENCES

1. Mikhailov, A. V. *Golovnye sistemy pitaniya sudokhodnykh shlyuzov i ikh raschet*. M.: Minrechflot SSSR, 1951.
2. Gapeev, A. M. *Sovershenstvovanie ekspluatatsionnykh kachestv sudokhodnykh shlyuzov s golovnoi sistemoi pitaniya*. Abstract of Dr. diss. SPb.: SPGUVK, 1999.
3. Atavin, A. A., V. I. Bukreev, O. F. Vasil'ev, V. V. Degtyarev (ml.), and A. P. Yanenko. *Gidrodinamicheskie aspekty neshatnykh i avariinykh situatsii na gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh: monografiya*. Edited by V.V. Degtyarev. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2009.
4. Lavrinovskii, M. S. "Chislennye metody resheniya sistemy uravnenii sovmestnykh kolebaniy vody i tolkaemogo sostava v kamere sudokhodnogo shlyuza." *Nauch.-metod. konf.: tez dokl.* SPb: SPGUVK, 1998. Ch. 2. Pp.148.
5. Vasil'ev, O. F. "Priblizhennyye differentsial'nye uravneniya kolebaniy vody v sudovoznykh kamerakh naklonnykh sudopod'emnikov i kamerakh shlyuzov s sosredotochennymi sistemami napolneniya." *Nauchnye doklady vysshei shkoly. Ser. «Stroitel'stvo»* 2 (1958): 243–251.

6. Vasil'ev, O. F. "Prisoedinennaya massa zhidkosti dlya sudna, sovershayushchego kolebaniya v kamere sudokhodnogo sooruzheniya." *Prikladnaya mekhanika i teoreticheskaya fizika* 3 (1961): 61–71.
7. Kublanov, M. S. "Check of the mathematical model adequacy." *Civil Aviation High Technologies* 211(1) (2015): 29–36.
8. Chepurensko, V. G., V. G. Nizhnik, and N. I. Sokolova. *Vychislenie pogreshnostei izmerenii*. Kiev: Vyshcha shk., 1978.
9. Webb, J., and Wu Peng. "Innovations in Lock Filling and Emptying Systems." *Paper 5 of PIANC Workshop*. 2009. 15–16.
10. Wang, Hong-zhi, and Zao-jian Zou. "Numerical prediction of hydrodynamic forces on a ship passing through a lock." *China Ocean Engineering* 28.3 (2014): 421–432. DOI 10.1007/s13344-014-0034-3.
11. Wang, H. Z., and Z. J. Zou. "Behaviours of a Ship Passing through a Lock under the Influence of a Berthed Ship." *International Workshop on Next Generation Nautical Traffic Models*. Delft, The Netherlands, 2013.
12. Ryabov, G. G. *Opreделение parametrov sistemy napolneniya sudokhodnogo shlyuza s do-polnitel'nyim puskom vody poverkh vorot*. Abstract of PhD diss. SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2013.
13. *Pravila klassifikatsii i postroiki sudov*. M.: Rossiiskii rechnoi registr, 2015. Vol. 3. Part V. Sudovye ustroistva i snabzhenie.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Ушакевич Александр Николаевич —
Научный сотрудник
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: ushakevich@list.ru, RyabovGG@gumrf.ru

Смирнов Руслан Сергеевич —
Научный сотрудник
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: srs-82@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ryabov, Georgiy G. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: ryabovgg@yandex.ru,
RyabovGG@gumrf.ru

Ushakevich, Alexandr N. —
Scientific worker
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: ushakevich@list.ru, RyabovGG@gumrf.ru

Smirnov, Ruslan S. —
Scientific worker
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: srs-82@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 11 сентября 2017 г.
Received: September 11, 2017.*