

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-158-169

INVESTIGATION OF EFFECTS ARISING IN THE PROCESS OF PNEUMATIC CLEANING OF THE RAW WATER INTAKE SCREENS

A. K. Afanasev, M. P. Lebedeva, Yu. V. Yatsuk

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

The process of development of gas-liquid flow output from raw water intake is under consideration in the work. The main target of work was to free surface bump dimensions determine and the opportunity of bump dimensions influence on navigation safety obtain. The description process was based on towing tank tests results of two different prototype units and of it's simplify model as well. The results recalculation on the real condition was done using Froude number, Reynolds number and Weber number. The speed feeding of compressed air was calculated taking into account the power consumption of device. The towing tank tests results show that the form of free surface bump on surface projection is approximate circle. The circle diameter is equal to raw water intake length. The gas-liquid flow divided into separate bubbles near output of device but before the filter surface. The bubbles come to the surface separately. No tendency to combine the small bubbles into large one was observed. The angle between the free surface bump slope and smooth free surface concur with angle of wave slope. So the bump could be dangerous for the small boat with poor seaworthiness. The sudden roll angle enlarge could be the reason of boat overturn.

Keywords: raw water intake, gas-liquid flow, two-phase flow, gas jet in the water, safety of river ships navigation.

For citation:

Afanasev, Andrei K., Marina P. Lebedeva, and Yury V. Yatsuk. "Investigation of effects arising in the process of pneumatic cleaning of the raw water intake screens." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 158–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-158-169.

УДК 628.113.82; 629.122; 532.517

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ РУСЛОВЫХ ВОДОЗАБОРНИКОВ

А. К. Афанасьев, М. П. Лебедева, Ю. В. Яцук

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

Рассматривается процесс развития газожидкостной струи, возникающей при продувке воздухом фильтрующих элементов (сеток, решёток) русловых водозаборников. Целью работы является определение размеров бугра, возникающего на свободной поверхности и оценка возможности его влияния на безопасность судоходства в акватории. В рамках работы в опытном бассейне ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» были испытаны два макета водозаборников и схематизированная модель. Испытания проводились с учетом критериев подобия Фруда, Рейнольдса и Вебера. Описана экспериментальная установка и методика проведения испытаний. Полученные результаты позволили выполнить оценку размеров газожидкостного бугра, возникающего на поверхности воды. В ходе испытаний, проведенных в гидродинамическом лотке ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», была получена качественная оценка взаимодействия газожидкостной струи с внешним течением. На завершающем этапе работ были проведены наблюдения процесса продувки натурального водозаборника, установленного в русле реки. Определено, что на спокойной поверхности воды образуется бугор, имеющий круглую форму в плане. Диаметр пузыря приблизительно равен длине водозаборника. Проведенный анализ показал, что эффекты, сопровождающие процесс продувки водозаборников, установленных в районах, открытых для судоходства,

не представляют опасности для средних и крупных судов. В то же время возникновение газожидкостного бугра под днищем маломерных плавсредств (гребные лодки, мотолодки), не обладающих достаточными мореходными качествами, может привести к их заливанию и / или опрокидыванию. Это означает, что решение об установке русловых водозаборников, оборудованных пневматической системой очистки фильтрующих элементов, должно сопровождаться анализом степени безопасности конструкции для маломерного судоходства.

Ключевые слова: водозаборник, газожидкостная струя, двухфазные течения, струя газа в жидкости, безопасность судоходства.

Для цитирования:

Афанасьев А. К. Исследование эффектов, возникающих в процессе пневматической очистки фильтрующих элементов русловых водозаборников / А. К. Афанасьев, М. П. Лебедева, Ю. В. Яцук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 158–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-158-169.

Введение (Introduction)

В процессе эксплуатации русловых водозаборных сооружений происходит засорение сорудерживающих решёток и сеток водоприемных оголовков. Один из возможных способов борьбы с засорением заключается в продувке фильтрующих элементов водозаборников сжатым воздухом.

Цель работы заключается в оценке эффектов, возникающих вблизи поверхности воды в процессе продувки, с точки зрения безопасности судоходства на внутренних водных путях.

Вопросы, связанные с истечением газовых струй в жидкость, рассматриваются в ряде работ, в основном посвящённых проблемам безопасности морских газовых месторождений и морских газопроводов [1] – [3]. Как следует из рассмотренных публикаций, возможны три характерных режима выброса газовой струи в жидкость:

- медленное образование пузырей в месте выброса;
- непрерывное истечение газовой струи, которая распадается на отдельные пузыри непосредственно у места выброса;
- компактная струя газа, постепенно эжектирующая капли жидкости.

Воздушные пузыри, образовавшиеся после распада струи, всплывают вверх под действием силы Архимеда, увлекая за собой массы жидкости, что приводит к образованию на поверхности газожидкостного бугра. Увеличение высоты столба жидкости над местом выброса должно, с одной стороны, приводить к вовлечению в движение больших масс жидкости и увеличению высоты газожидкостного бугра, с другой — к уменьшению высоты бугра вследствие расширения струи.

Как следует из анализа, выполненного с использованием теории размерностей [4], основными критериями динамического подобия процесса истечения струй воздуха через слой жидкости являются числа Фруда, Рейнольдса и Вебера. Критерий подобия Фруда показывает соотношение сил инерции и сил тяжести, характеризует процесс волнообразования на поверхности. Критерий подобия Рейнольдса показывает соотношение сил инерции и сил трения, он определяет скорость движения пузырей в потоке. Критерий подобия Вебера показывает соотношение сил инерции и сил поверхностного натяжения, служит мерой увлечения жидкости за движущимися в ней пузырями.

Для обеспечения равенства чисел Фруда при истечении воздуха из натурного водозаборника и из его модели необходимо, чтобы отношение массовых расходов воздуха у модели и натурной было равно масштабу в степени $2^{1/2}$:

$$\frac{Q_{M_n}}{\rho \delta_n^2 \sqrt{g \delta_n}} = \frac{Q_{M_m}}{\rho \delta_m^2 \sqrt{g \delta_m}}; Q_{M_n} = Q_{M_m} \frac{\delta_n^2 \sqrt{\delta_n}}{\delta_m^2 \sqrt{\delta_m}} = Q_{M_m} S_c^{2/2}. \quad (1)$$

Для обеспечения равенства чисел Рейнольдса необходимо, чтобы отношение массовых расходов воздуха было обратно пропорционально масштабу:

$$Q_{M_n} = Q_{M_m} \frac{\delta_m}{\delta_n} = \frac{Q_{M_m}}{S_c}. \quad (2)$$

Для обеспечения равенства чисел Вебера необходимо, чтобы отношение массовых расходов воздуха было равно масштабу в третьей степени:

$$Q_{M_n} = Q_{M_m} \frac{\delta_n^3}{\delta_m^3} = Q_{M_m} \cdot Sc^3. \quad (3)$$

Как следует из выражений (1) – (3), одновременное строгое соблюдение хотя бы двух критериев динамического подобия оказывается невозможным. В публикации [4] предлагается моделировать истечение газовых струй в жидкость по критерию Фруда, исходя из предположения о том, что процесс является автомодельным по числам Вебера и Рейнольдса, однако доказательств автомодельности не представлено. В связи с ранее изложенным, было принято решение осуществлять моделирование продувки водозаборника по числу Фруда, рассматривая полученные результаты как качественные. Для получения количественной оценки высоты газожидкостного бугра было решено смоделировать фрагмент водозаборника, состоящий из одного отверстия и проницаемой поверхности, что позволило обеспечить выполнение всех трёх критериев динамического подобия.

Продолжительность модельного эксперимента при исследовании работы макета должна рассчитываться с учётом критерия кинематического подобия — числа Струхала (St):

$$t_m = \frac{Q_{M_n} t_n \delta_m^3}{Q_{M_m} \delta_n^3} = \frac{t_n}{\sqrt{Sc}}. \quad (4)$$

Для решения поставленной задачи были проведены экспериментальные исследования в соответствии со следующей программой:

- испытания макета водозаборника на тихой воде с целью качественного исследования процесса в зависимости от расхода воздуха и заглубления макета. Измеряемые параметры: высота столба жидкости над водозаборником $H_{с_м}$, расход воздуха через водозаборник Q_{M_m} , высота $H_{б_м}$ и размеры в плане газожидкостного бугра в зависимости от расхода;

- исследование истечения одиночной струи из отверстия диаметром 6 мм при наличии проницаемой поверхности. Расход воздуха через отверстие соответствовал расходу воздуха, наблюдаемому в натуральных условиях. Измеряемые параметры: высота столба жидкости над отверстием $H_{с_м}$, расход воздуха через отверстие Q_{M_m} , высота $H_{б_м}$ и размеры в плане газожидкостного бугра в зависимости от расхода;

- испытания макета водозаборника в присутствии внешнего течения с целью получения качественных данных о структуре газожидкостной струи в поперечном потоке и оценке высоты газожидкостного бугра в условиях течения. Измеряемые параметры: высота столба жидкости над водозаборником $H_{с_м}$, расход воздуха через водозаборник Q_{M_m} , высота газожидкостного бугра $H_{б_м}$ при постоянном расходе;

- наблюдения за процессом продувки близкого по конструкции водозаборника, установленного в русле реки.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для проведения исследований процесса продувки водозаборника в части определения характеристик газожидкостного бугра, образующегося на свободной поверхности акватории, была создана экспериментальная установка в опытовом бассейне ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». Опытный бассейн представляет из себя бетонную чашу длиной 120 м, шириной 6 м и глубиной 3,3 – 3 м.

Состав экспериментальной установки (рис. 1): компрессор 3, позволяющий обеспечивать давление сжатого воздуха в ресивере 4 до 750 кПа. Контроль давления сжатого воздуха в ресивере осуществлялся посредством образцового манометра МО-160 класса точности 0,4 с пределом измерения 1 МПа. Из ресивера сжатый воздух по воздушной магистрали 9 поступал в макет водозаборника 2. Измерение величины расхода производилось посредством измерительного комплекса 6, состоящего из трубки Вентури и дифференциального датчика давления ПД-11, а также цифрового

регистратора «Электрон» 10. Подключение к цифровому регистратору компьютера 11 позволило непрерывно регистрировать расход воздуха, поступающего в водозаборник. Расходно-напорные характеристики экспериментальной установки приведены на рис. 2.

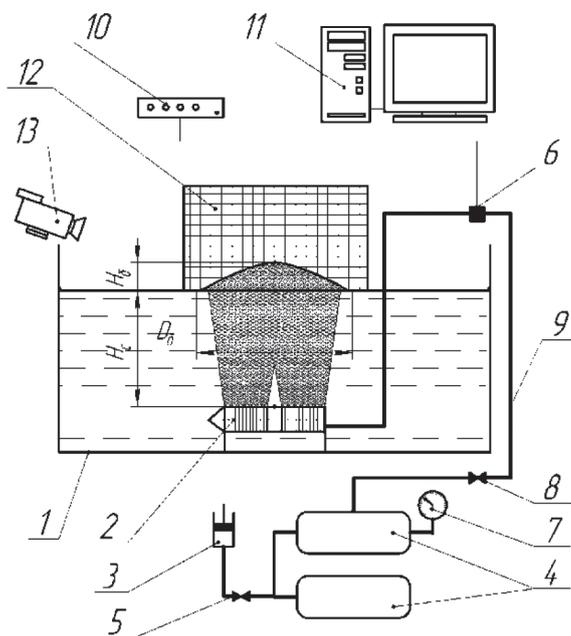


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — опытный бассейн; 2 — макет водозаборника; 3 — компрессор; 4 — ресивер; 5 — вентиль; 6 — трубка Вентури с датчиком ПД-11; 7 — манометр; 8 — пусковой кран; 9 — воздуховод; 10 — электронный частотомер; 11 — компьютер; 12 — сетка; 13 — видеокамера

Определение геометрических характеристик газожидкостного бугра на свободной поверхности воды проводилось визуально при помощи «измерительной сетки» 12 с шагом ячеек в 1 см, а также обработки видеозаписей, полученных с помощью видеокамеры 13, регистрирующей вид свободной поверхности в месте образования газожидкостного бугра.

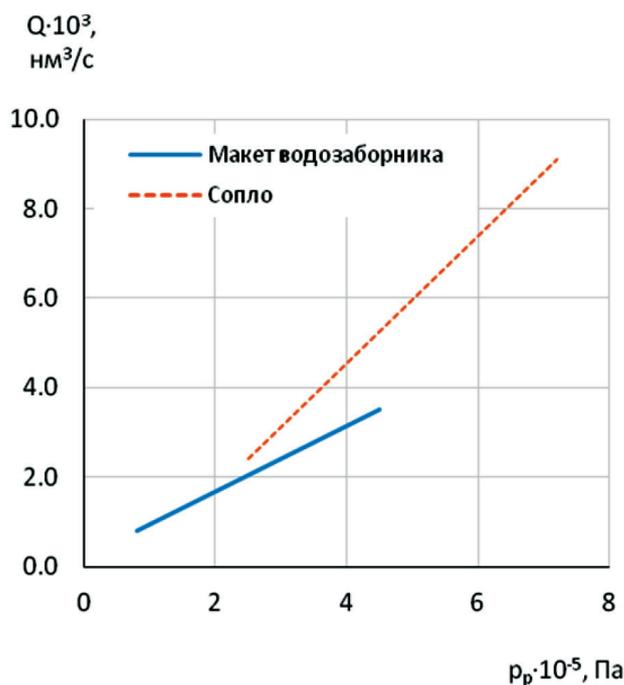


Рис. 2. Расходно-напорная характеристика экспериментальной установки

Для проведения испытаний в присутствии внешнего течения макет водозаборника устанавливался в гидродинамической лотке, имеющей длину 10 м, ширину 0,5 м и глубину 0,65 м. В лотке может быть создано течение со скоростью до 0,25 м/с.

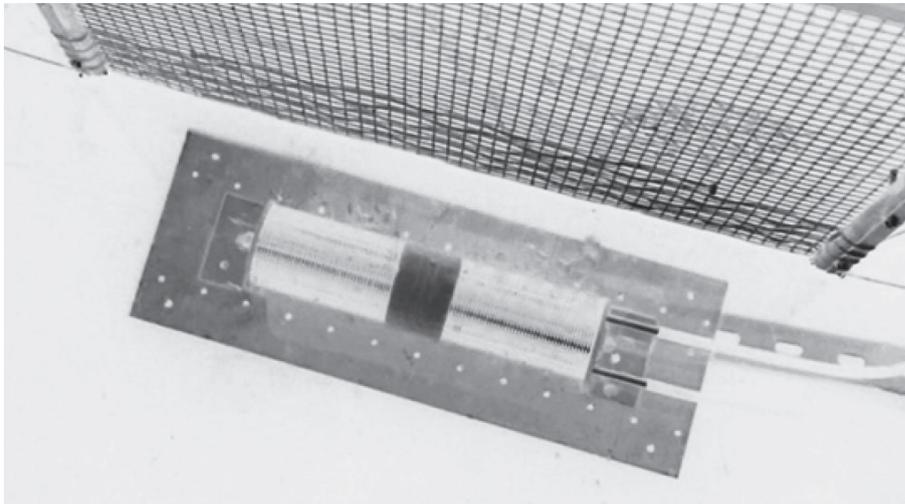


Рис. 3. Макет водозаборника

Исходя из технических возможностей лаборатории, было принято решение проводить испытания макетов № 1 и 2 реальных водозаборников, изготовленных в масштабе $S_c = 20 \dots 23$. Макеты водозаборников № 1 и 2 (рис. 3) представляли собой проницаемую конструкцию, выполненную в виде цилиндрической пружины. Зазор между витками образовывал щели, служащие проницаемой частью фильтра. Геометрические характеристики макетов водозаборников приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры	Макет № 1	Макет № 2
Диаметр, мм	85	75
Длина рабочей части, мм	250	221
Величина зазора между витками, мм	0,2	1,5
Ширина витка, м	1,5	1,5
Масштаб	20	22,7

При исследовании истечения струи из отверстия диаметром 6 мм макет, состоящий из сопла и фрагмента фильтрующей поверхности, устанавливался на дне бассейна.

Результаты (Results)

Испытания макетов водозаборников (рис. 4) в опытовом бассейне были проведены при заглублениях H_{cm} от 0,48 до 3 м. Расход воздуха Q изменялся в диапазоне от 0,001 до 0,0035 Н·м³/с. Высота газожидкостного бугра и его размеры в плане определялись путём обработки видеозаписей. Как следует из результатов испытаний, форма газожидкостного бугра в плане близка к окружности с диаметром, равным длине водозаборника.

В ходе работы было выполнено фотографирование для изучения процесса развития газожидкостной струи. Анализ полученных фотографий позволил установить, что средняя скорость движения пузырей в газожидкостной струе составляет 0,59 м/с. Полученный результат хорошо согласуется с данными о пузырьковых течениях, представленными в работе [5].

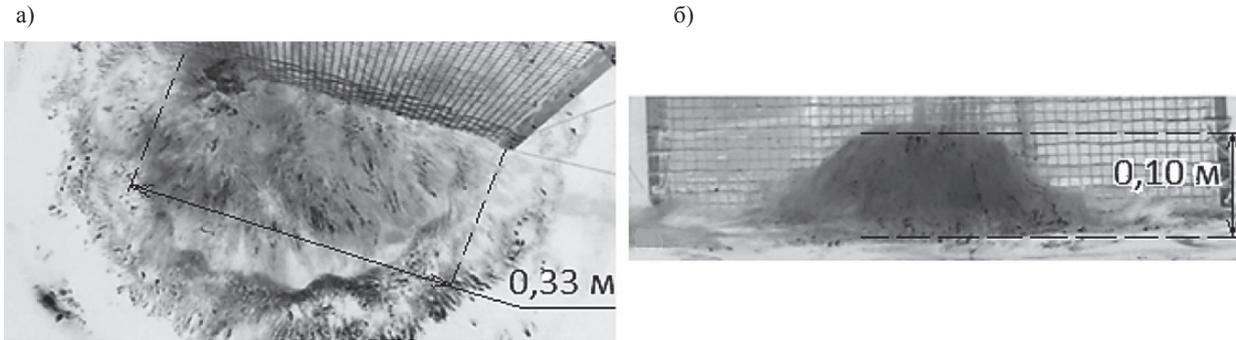


Рис. 4. Испытания макета водозаборника № 2 (глубина 0,48 м):
 а — вид сверху; б — вид сбоку

На рис. 5 представлены результаты измерения высоты газожидкостных бугров в зависимости от давления воздуха в ресивере и глубины. Как следует из рисунка, процесс продувки характеризуется высокой степенью нестабильности. Зависимость результатов испытаний от глубины оказалась сравнительно слабой. В ходе испытаний было установлено, что выход воздуха из водозаборника в макете № 1 осуществляется не по всей поверхности, а лишь по «гребню» фильтрующего элемента. Однако на элементах газожидкостного бугра это обстоятельство практически не отразилось.

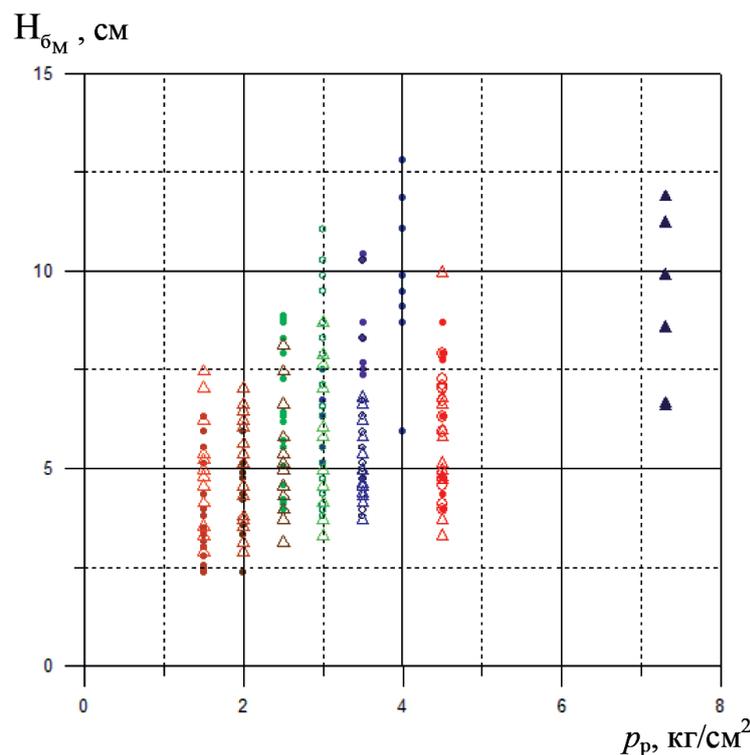


Рис. 5. Высоты газожидкостных бугров в зависимости от давления в ресивере p_p и глубины установки макета водозаборника под свободной поверхностью $H_{бм}$
 Условные обозначения:
 • — глубина 3 м; о — глубина 2 м; Δ — глубина 0,48 м

Следует отметить, что при прекращении подачи воздуха газожидкостный бугор практически сразу разрушается. Таким образом, можно ожидать, что время существования бугра в натуральных условиях будет близким к продолжительности продувки водозаборника воздухом.

При испытаниях сопла диаметром 6 мм расход воздуха Q изменялся от 0,01 нм³/с до 0,0025 нм³/с (для моделируемого натурального водозаборника максимальный расход воздуха через одно подающее отверстие составляет 0,004 нм³/с). Таким образом, режимы течения через сопло, достигнутые в ходе эксперимента, соответствуют натурным. В ходе испытаний осуществлялась как надводная, так и подводная видеосъемка (рис. 6).

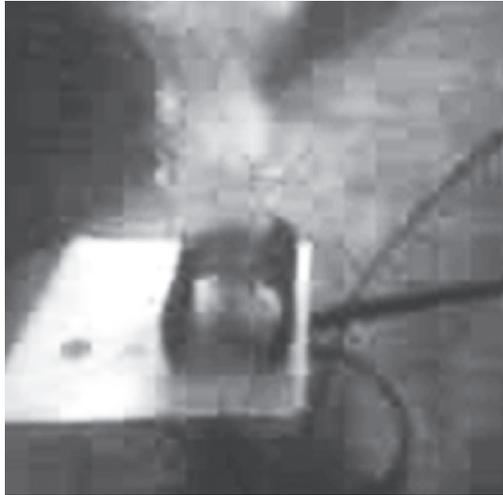


Рис. 6. Испытания макета сопла (подводная съемка)

Как показала обработка видеозаписей, распад газовой струи на отдельные пузыри происходит в непосредственной близости от сопла, еще до контакта струи с фильтрующей поверхностью. Тенденции к последующему объединению пузырей не выявлено. Полученные результаты соответствуют данным, представленным в [4], [6], [7].

Обработка видеозаписей позволила установить, что объем газожидкостного бугра над одиночным соплом в отсутствие течения при расходе $Q = 0,004$ нм³/с изменяется от 0,012 до 0,022 м³. Таким образом, объем газожидкостного бугра над натурным водозаборником (528 отверстий) будет изменяться от 6,3 м³ до 12 м³.

При проведении испытаний в гидродинамическом лотке (рис. 7), во избежание переливания воды через край лотка, давление в ресивере поддерживалось равным 2 кг/см². Испытания при отсутствии течения показали, что высота газожидкостного бугра соответствует измеренной в опытовом бассейне и, таким образом, ограниченность поперечного сечения лотка не отражается на результатах испытаний.

При проведении испытаний на течении со скоростью $U = 0,25$ м/с было установлено, что высота газожидкостного бугра уменьшается ориентировочно до 60 % от высоты на спокойной воде, а угол волнового склона близок к углу склона ветровых волн. Скорость подъема пузырей, приближенно оцененная при испытании модели водозаборника в гидродинамическом лотке, составила $V = 0,54$ м/с. Близкое значение (0,59 м/с) было зафиксировано при обработке видеозаписей, полученных при испытаниях в опытовом бассейне.

Исходя из предположения о том, что внешний поток не оказывает влияния на скорость всплытия пузырей, получим, что угол отклонения газожидкостной струи от вертикали должен составить $\zeta = \arctg\left(\frac{U}{V}\right) = \arctg\left(\frac{0,25}{0,54}\right) \approx 25^\circ$. Анализ видеозаписей показывает, что угол отклонения газожидкостной струи внешним потоком составляет ориентировочно 35°. Полученные результаты качественно соответствуют данным об отклонении струи внешним потоком, представленным в публикации [8].

а)



б)

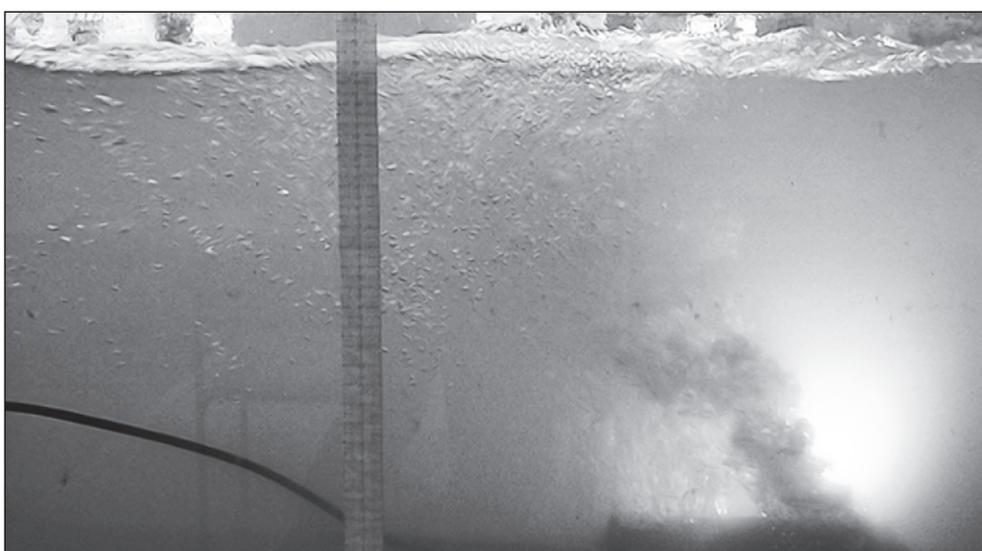


Рис. 7. Испытания макета № 2 в гидродинамическом лотке:
а — без течения; б — на течении 0,25 м/с (направление течения: справа-налево)

На завершающем этапе исследований была выполнена видеозапись процесса продувки системы, состоящей из двух натуральных водозаборников, конструктивно аналогичных рассматриваемым. Натурная система была размещена вблизи берега реки, скорость течения в месте установки системы, по оценке авторов статьи (*прим. ред.*), составляет 0,2 – 0,25 м/с. Каждый водозаборник имеет диаметр 0,4 м и длину 2,5 м. В момент записи расстояние от поверхности воды до водозаборника составляло 1,8 м.

Как видно из представленных фотографий (рис. 8), в начальный момент поверхность воды над водозаборниками покрыта системой пузырей, образованных водно-воздушной смесью, имеющих сферическую форму. В дальнейшем наблюдается разрушение пузырей с образованием локальных выбросов водовоздушной смеси. Максимальная высота подъема водовоздушной смеси отмечается на первой секунде продувки и по оценкам авторов статьи (*прим. ред.*) может достигать 0,5 м. Этот выброс проявляется в виде изолированной струи малого диаметра. Через 1,5 с от начала продувки высота газожидкостного бугра снижается до 0,3 м и остается практически неизменной в последующие 6 с.



Рис. 8. Процесс продувки натуральных водозаборников:
а — продувка одного водозаборника; б — продувка двух водозаборников

Список использованных в статье обозначений и пояснений к ним дан в табл. 2.

Таблица 2

Обозначение	Пояснение
D_6	Диаметр (условный) основания газожидкостного бугра на уровне свободной поверхности, м (Suppositive Diameter of Gas Liquid Bump on the free Water Surface Level, m)
$Fr = \frac{Q_M}{\rho \delta^2 \sqrt{g \delta}}$	Число Фруда (Froude Number)
H_6	Высота газожидкостного бугра над невозмущенной поверхностью воды, м (Suppositive Height of Gas Liquid Bump over the Free Water Surface Level, m)
H_c	Высота столба жидкости над оголовком, м (Distance from Water Intake to free Water Surface, m)
g	Ускорение свободного падения, м/с ² (Acceleration of Gravity, m/s ²)
p	давление, Па (Pressure, Pa)
Q	Объемный расход воздуха, приведенный к нормальным условиям, м ³ /с (Volumetric air Flow Rate at Atmospheric Pressure, m ³ /s)
Q_M	Массовый расход воздуха, кг/с (Air Flow Rate, kG/s)
$Re = \frac{\delta Q_M}{\mu_B}$	Число Рейнольдса (Reynolds Number)
S	Суммарная площадь отверстий, через которые осуществляется подача воздуха, м ² (Total Area of Holes for air Supply in the Water Intake, m ²)
S_c	Масштаб модели (Scale Factor)
$St = \frac{Q_M t}{\rho_B \delta^3}$	Число Струхала (Strouhal Number)

Таблица 2
 (Окончание)

t	Время, с (time, s)
V	Скорость всплытия газожидкостной струи, м/с (Mean Speed of air Bubbles in Gas Liquid Jet, m/s);
U	Скорость внешнего течения, м/с (Velocity of External Flow, m/s)
$We = \frac{Q_m}{\rho_B \delta^3 \sigma}$	Число Вебера (Weber Number)
$\delta = \sqrt{S}$	Гидравлический радиус, м (Hydraulic Radius, m)
μ	Динамическая вязкость воды, Па·с (Dynamic Viscosity of Water, Pa·s)
μ_B	Динамическая вязкость воздуха, Па·с (Dynamic Viscosity of Air, Pa·s)
ρ	Плотность воды, кг/м ³ (Water Density, kG/m ³)
ρ_B	Плотность воздуха, кг/м ³ (Air Density, kG/m ³)
σ	Поверхностное натяжение между воздухом и водой, Дж/м ² (Surface Tension Between air and Water, J / m ²)
ζ	Угол отклонения газожидкостной струи внешним потоком, ° (Angle of Deflection of a Gas Liquid jet by an External Flow, °)
Индексы (subscripts):	
m	модель (Model Scale);
n	натурный объект (Full Scale);
p	ресивер (Receiver)

Обсуждение (Discussion)

Оценки, выполненные с использованием полученных экспериментальных данных, показывают, что высота газожидкостного бугра, возникающего при продувке водозаборника, установленного в акватории разряда «Р» [9] на глубине 10 м при скорости течения 1 – 2 м/с, не превысит 0,72 м, а угол волнового склона будет близок к углу волнового склона ветровых волн [10]. Основание бугра будет иметь форму, близкую к кругу радиусом 5 – 10 м. Бугор будет сноситься вниз по потоку относительно водозаборника на расстояние 20 – 30 м. Продолжительность существования бугра будет близка к продолжительности процесса продувки оголовка воздухом.

В ходе проведенных модельных испытаний было установлено, что струи воздуха, образующиеся в процессе продувки, будут распадаться на отдельные пузыри еще в пределах водозаборника. Тенденции к дальнейшему слиянию пузырей не выявлено. Таким образом, оснований опасаться возникновения внезапной просадки маломерного судна, оказавшегося в момент продувки над водозаборником, нет.

Поскольку расчетная высота волны для водных бассейнов разряда «Р» составляет 1,2 м [9], можно утверждать, что процесс продувки фильтра-оголовка будет безопасен для всех судов класса «Р» Российского Речного Регистра. Безопасность плавания маломерных судов, не состоящих под надзором Российского Речного Регистра, будет определяться степенью соответствия их мореходных качеств условиям плавания в рассматриваемом водном бассейне.

Заключение (Conclusion)

Процесс очистки фильтрующих элементов русловых водозаборников с использованием сжатого воздуха приводит к появлению струйного течения, направленного вверх, и сопровождается

появлением на поверхности воды газожидкостного бугра. Размеры бугра в плане определяются габаритами водозаборника и могут достигать нескольких метров, а его высота сопоставима с высотой развитых ветровых волн или волн, создаваемых крупными быстроходными судами.

Выполненный анализ показывает, что для судов, длина которых превосходит диаметр бугра, а остойчивость соответствует требованиям нормативных документов, процесс продувки не будет представлять какой-либо опасности.

В то же время возникновение газожидкостного бугра под днищем маломерных плавсредств (гребные лодки, мотолодки), не обладающих достаточными мореходными качествами, может привести к их заливанию и/или опрокидыванию. Это означает, что решение об установке русловых водозаборников, оборудованных пневматической системой очистки фильтрующих элементов, должно сопровождаться анализом степени безопасности конструкции для маломерного судоходства.

Авторы выражают благодарность коллективу Испытательного центра гидротехнических сооружений ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» за помощь в организации и проведении эксперимента в гидродинамическом лотке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафонов В. С. Моделирование физических эффектов при аварийных разрывах подводных газопроводов / В. С. Сафонов, С. В. Ганага // Науч.-техн. сб. «Вести газовой науки». — 2013. — № 3 (14). — С. 212–219.
2. Максимов В. М. Некоторые проблемы экологической и промышленной безопасности природно-техногенных морских объектов при освоении шельфа Арктики / В. М. Максимов, М. К. Тупысев, С. М. Пронюшкина, Л. Г. Кульпин // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 4 (16). — С. 60–67.
3. Сафонов В. С. Методические аспекты анализа аварийных процессов на подводных газопроводах / В. С. Сафонов, А. В. Мельников, С. В. Ганага // Науч.-техн. сб. «Вести газовой науки». — 2015. — № 2 (22). — С. 155–163.
4. Иванников А. В. Экспериментальное исследование истечения газожидкостной струи через слой жидкости: дис. ... канд. техн. наук / А. В. Иванников. — М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2007. — 141 с.
5. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис. — М.: Мир, 1972. — 440 с.
6. Исаев В. И. Экспериментальная установка и методика исследования дебита газового фонтана по параметрам газо-водяного бугра на поверхности жидкости в кратере / В. И. Исаев // Сб. «Нефть и газ». — М., 1972. — С. 108–109.
7. Leifer I. Engineered and Natural Marine Seep, Bubble-Driven Buoyancy Flows / I. Leifer, H. Jeuthe, S. H. Gløsdund, V. Johansen // Journal of Physical Oceanography. — 2009. — Vol. 39. — Is. 12. — Pp. 3071–3090. DOI: 10.1175/2009JPO4135.1.
8. Masutani S. M. Experimental study of multi-phase plumes with application to deep ocean oil spills / S. M. Masutani, E. E. Adams // Final Report. — Honolulu, Hawaii: University of Hawai'i, 2001. — 147 p.
9. Российский Речной Регистр. Правила: в 4 т. — М.: Российский Речной Регистр, 2015.
10. Справочник по теории корабля / под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. — 768 с.

REFERENCES

1. Safonov, V.S., and S.V. Ganaga. "Modelirovanie fizicheskikh effektov pri avariinykh razryvakh podvodnykh gazoprovodov." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Vesti gazovoi nauki* 3(14) (2013): 212–219.
2. Maksimov, V.M., M.K. Tupysev, S.M. Pronyushkina, and L.G. Kulpin. "The Problems of Environmental and Industrial Safety of Natural and Man-Made Marine Facilities during Development of the Arctic Shelf." *Arctic: ecology and economy* 4(16) (2014): 60–67.
3. Safonov, V. S., A. V. Mel'nikov, and S. V. Ganaga. "Metodicheskie aspekty analiza avariinykh protsessov na podvodnykh gazo-provodakh." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Vesti gazovoi nauki* 2(22) (2015): 155–163.

4. Ivannikov, A. V. Eksperimental'noe issledovanie istecheniya gazozhidkostnoi strui cherez sloi zhidkosti. PhD diss. M.: RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2007.
5. Uollis, G. *Odnomernye dvukhfaznye techeniya*. M.: "Mir", 1972.
6. Isaev, V.I. "Eksperimental'naya ustanovka i metodika issledovaniya debita gazovogo fontana po parametram gazo-vodyanogo bugra na poverkhnosti zhidkosti v kratere." *Sbornik "Neft' i gaz"*. M., 1972: 108–109.
7. Leifer, Ira, H. Jeuthe, S. H. Gløsdund, and V. Johansen. "Engineered and natural marine seep, bubble-driven buoyancy flows." *Journal of Physical Oceanography* 39.12 (2009): 3071–3090. DOI: 10.1175/2009JPO4135.1
8. Masutani, Stephen M., and E. Eric Adams. "Experimental study of multi-phase plumes with application to deep ocean oil spills." *Final Report*. Honolulu, Hawaii: University of Hawai'i, 2001.
9. *Rossiiskii Rechnoi Registr. Pravila (v 4-kh tomakh)*. M.: Rossiiskii Rechnoi Registr, 2015.
10. Voitkunskii, Ya.I., ed. *Spravochnik po teorii korablya*. Vol. 1. Gidromekhanika. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli. L.: Sudostroenie, 1985.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Афанасьев Андрей Константинович —

кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова».
 198035, Российская федерация,
 Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: imp45@yandex.ru, kaf_texp@gumrf.ru

Лебедева Марина Петровна —

кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская федерация,
 Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: imp45@yandex.ru, LebedevaMP@gumrf.ru

Яцук Юрий Владимирович —

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

Afanasev, Andrei K. —

PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
 198035, Russian Federation
 e-mail: imp45@yandex.ru, kaf_texp@gumrf.ru

Lebedeva, Marina P. —

PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
 198035, Russian Federation
 e-mail: imp45@yandex.ru, LebedevaMP@gumrf.ru

Yatsuk, Yury V. —

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

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.

Received: January 15, 2018.