

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-83-102

УДК 629.5.062.2:629.5.081.326

А.И. Штода

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

# ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ УДАЛЕНИЯ ВОЗДУХА ИЗ ТРУБОПРОВОДОВ БАЛЛАСТНЫХ СИСТЕМ ПЛАВУЧИХ ДОКОВ

**Объект и цель научной работы.** Объектом исследования являются современные технические решения для удаления воздушных масс, проникающих в трубопроводы балластных систем плавучих доков, применяемые в судостроении. Цель работы – определение эффективности различных конструкторских решений и специальных устройств, применяемых в процессе создания и эксплуатации плавдоков, путем моделирования процессов сепарации аэрированных пространственных потоков в насосных камерах и коллекторах балластных систем на экспериментальной установке.

**Материалы и методы.** Официальные информационные материалы в области науки и техники на тему аналитических и экспериментальных исследований процессов удаления воздуха в судовых системах. Методология механики жидкости и газа, методы теории размерности, экспериментальные методы.

**Основные результаты.** Рассмотрены достижения в области создания и эксплуатации балластных систем плавучих доков и плавучих буровых установок, а также в гидротехнических сооружениях. На экспериментальной гидравлической установке с помощью модифицируемых макетов по разработанной программе и методике проведены испытания ряда специальных технических решений, применяемых в балластных системах плавучих сооружений для управления процессами отделения и удаления воздуха, проникающего во всасывающие трубопроводы.

В связи с известной сохраняющейся проблемой продления работы балластных насосов на заключительных стадиях дебалластировки отсеков плавдоков выполнена экспериментальная оценка оригинальности и прогрессивности ряда компоновочных конструкторских решений, применяемых в водоводах насосных отделений плавучих доков. В балластных системах проявились несовершенства внутренних устройств в сборных трубопроводах-коллекторах и насосных камерах, обусловленные гидромеханическими особенностями взаимодействия двухфазных потоков в замкнутом стесненном пространстве.

Сложившееся состояние вопросов характеризует недостаточный уровень изученности течений в рассматриваемых условиях, определяющих развитие исследуемых объектов на современном этапе. Выявлены основные закономерности поведения избыточно аэрированных потоков в условиях водоводов балластных систем в насосном отделении, которые обладают физическими параметрами, установленными, согласно спецификациям, на применяемое в составе систем штатное насосное оборудование. Выполненные исследования восполняют недостающую информацию о поведении и взаимодействии аэрированных потоков внутри коллекторов и насосных камер различного конструктивного исполнения. Определены характерные значимые причины, препятствующие оптимизации происходящих процессов сепарации, обозначены перспективные конструктивные направления совершенствования применяемых балластных систем.

**Заключение.** Достигнутые результаты работ позволяют принимать рациональные решения о применении конкретного типа оборудования и оснащения в определенных условиях эксплуатации в составе балластных систем плавдоков и других плавсооружений сходного назначения. Предложенные технические решения актуальны для разработки более совершенного конструктивного исполнения сборных трубопроводов и насосных камер.

Экспериментальные материалы пригодны также для развития требований в области проектирования балластных систем плавучих доков и других плавсооружений с высокопроизводительными насосами. Полученные сведения о поведении аэрированных пространственных потоков жидкостей внутри замкнутых камер с изменяемым проходным сечением по мере поступления среды к насосу могут быть полезны и при проектировании рациональных водоводных камер в гидротехнических сооружениях с высокопроизводительными лопастными насосами.

**Ключевые слова:** плавучие доки, балластные системы, насосы, насосные камеры, коллекторы, приемные трубопроводы, экспериментальная установка, испытательный макет, двухфазные пространственные течения, аэрированные потоки, характеристики процессов, технические предложения.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

*Для цитирования:* Штода А.И. Исследования процессов удаления воздуха из трубопроводов балластных систем плавучих доков. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 3(401): 83–102.

*For citations:* Shtoda A.I. Studies on air removal processes from pipelines of floating docks ballast systems. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 3(401): 83–102 (in Russian).

## SHIP DESIGN AND STRUCTURE

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-83-102

UDC 629.5.062.2:629.5.081.326

A.I. Shtoda

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

# STUDIES ON AIR REMOVAL PROCESSES FROM PIPELINES OF FLOATING DOCKS BALLAST SYSTEMS

**Object and purpose of research.** The objective of the study are modern technical solutions for removal of air masses penetrating into the pipelines of ballast systems of floating docks used in shipbuilding. The purpose of the paper is to determine the effectiveness of various design solutions and special devices used in the process of design, construction and operation of floating docks by modeling the separation processes of aerated spatial flows in pumping chambers and collectors of ballast systems in experimental installation.

**Materials and methods.** Official information materials in the field of science and technology in the area of analytical and experimental studies of air removal processes in marine systems. Methodology of fluid mechanics, methods of dimension theory, experimental methods.

**Main results.** Achievements in the field of design, construction and operation of ballast systems for floating docks and floating drilling rigs, as well as in hydraulic structures were considered. To control the processes of separation and removal of air penetrating into suction pipelines, tests of a number of special technical solutions used in ballast systems of floating structures were carried out on an experimental hydraulic installation using modifiable models according to the developed program and methodology.

In connection with the well-known continuing problem of prolonging the operation of ballast pumps at the final stages of deballasting of floating dock compartments, an experimental assessment of the ingenuity and progressiveness of a number of layout design solutions used in the water ducts of pumping compartments of floating docks was carried out. In ballast systems, imperfections of internal devices in collecting pipelines-collectors and pumping chambers were manifested, due to the hydro-mechanical phenomena of the interaction of two-phase flows in an enclosed confined space.

The current state of the art is characterized by the insufficient level of knowledge of flows in the conditions under consideration governing the development of the objects under study at the present stage. The main patterns of excessively aerated flows behaviour in conditions of ballast system ducts in pumping compartment with physical parameters set, according to the specifications, for the standard pumping equipment used in the systems, are revealed. The performed studies fill in the missing information about the behaviour and interaction of aerated flows inside collectors and pumping chambers of various structural designs. The characteristic significant reasons hindering the optimization of the ongoing separation processes are identified, promising design directions for improving the applied ballast systems are identified.

**Conclusion.** The achieved results of the development allow us to make rational decisions about the use of a specific type of equipment and outfit in certain operating conditions as part of ballast systems of floating docks and other floating structures of similar purpose. The proposed technical solutions are relevant for the development of a more advanced structural design of collecting pipelines and pumping chambers.

Experimental materials are also suitable for the development of requirements in design of ballast systems of floating docks and other floating structures with high-performance pumps. The obtained data on behaviour of aerated spatial fluid flows inside closed chambers with a variable flow section as the medium flows to the pump can also be useful in designing rational water chambers in hydraulic structures with high-performance vane pumps.

**Keywords:** floating docks, ballast systems, pumps, pumping chambers, collectors, inlet pipelines, experimental installation, test layout, two-phase spatial flows, aerated flows, process characteristics, technical proposals.

*The author declares no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Плавучий док в современной терминологии является техническим сооружением, предназначенным для проведения осмотра и ремонтных работ подводной части корпуса судна [1]. По функциональному назначению плавучие доки многотипны и создаются в качестве ремонтных, передаточных (для

передислокации плавучего объекта из эллинга на воду), транспортных (для преодоления объектом с большой осадкой мелководий) и др. целей. Плавучие доки относятся к плавучим техническим сооружениям (рис. 1), подпадающим под наблюдение классификационных обществ.

Многочисленные типы и особенности создания плавучих доков, а также состав их функциональных систем и оборудования обстоятельно освещены в [2].

**Рис. 1.** Плавающий ремонтный док для плавбуровых установок и судов катамаранов

**Fig. 1.** Floating repair dock for drilling rigs and catamaran vessels

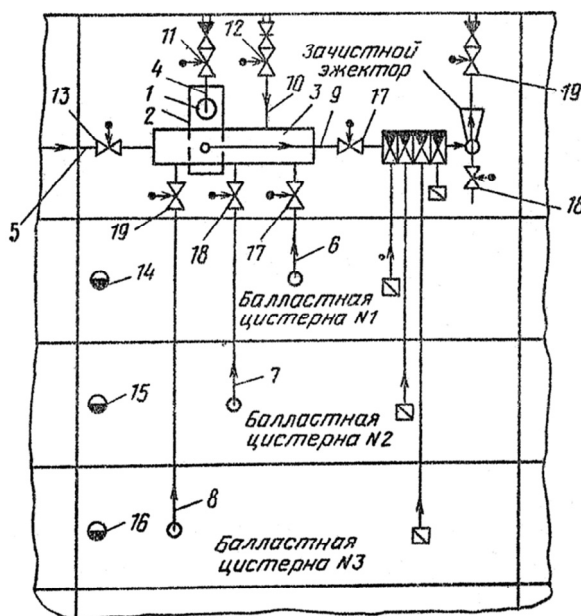


Проектирование балластных систем плавучих доков различного назначения осуществляется в соответствии с требованиями [3, 4]. Согласно действующим правилам проектирования, для обеспечения безопасности плавучего дока, обслуживающего персонала и докуемого объекта, установленного на кильблоках, опорных клетках и других специальных устройствах, осушение каждого балластного отсека должно обеспечиваться не менее чем двумя балластными насосами.

Примером типовой принципиальной схемы и компоновки насосного отделения плавучего дока, а также прилегающего участка балластной системы, совмещенной с зачистной системой (правильнее – осушительной), содержащей балластный насос и водоотливной эжектор, водоводы и коллекторы, приемные и отливные трубопроводы, судовую арматуру разных типов (дистанционно управляемую бортовую и путевую), может служить фрагмент общей балластной системы (рис. 2), приведенный в [5].

Таких насосных отделений, как показано на рис. 2, у плавучих доков в зависимости от назначения, грузоподъемности и конструктивного исполнения предусматривают обычно два и более. Участок балластной доковой системы вблизи насосного отделения и непосредственно внутри него, как правило, содержит несколько приемных трубопроводов (рис. 2, поз. 6–8) и, с точки зрения реализующихся гидравлических схем удаления балласта, является конструктивно сложным устройством.

Согласно действующим правилам и нормам [3, 4] скорость воды в трубопроводах балластной системы должна составлять порядка 2 м/с. Средняя скорость воды во всасывающем патрубке штатного балластного насоса, в зависимости от конкретной напорной характеристики, также находится в этих пределах. При таком скоростном режиме потоки откачиваемого балласта, поступающего поочередно или одновременно по всем всасывающим трубопроводам, в зависимости от программы обеспечения и диа-

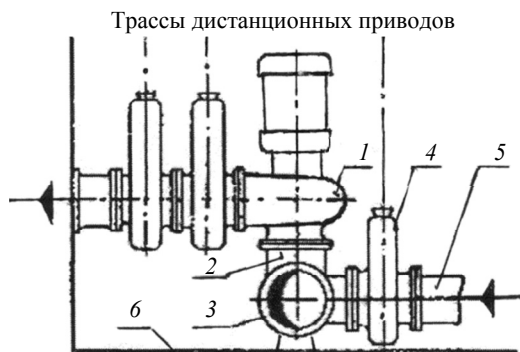


**Рис 2.** Принципиальная схема размещения и общий состав оборудования в насосном отделении плавучего дока и смежных участках балластной системы, совмещенной с зачистной системой:

1 – балластный насос; 2 – водопроводящая камера; 3 – распределительная коробка; 4 – отливной трубопровод; 5 – магистральный трубопровод; 6, 7, 8 – приемные трубопроводы; 9 – соединительный трубопровод; 10 – трубопровод приема балласта; 11, 12, 13, 17 – дистанционноуправляемая судовая арматура; 14, 15, 16 – сигнализаторы уровня; 18 – трубопровод «рабочей» воды эжектора; 19 – отливной трубопровод зачистной системы

**Fig. 2.** Schematic diagram of equipment arrangement and components in the pumping compartment of the floating dock and adjacent sections of the ballast system combined with the stripping system:

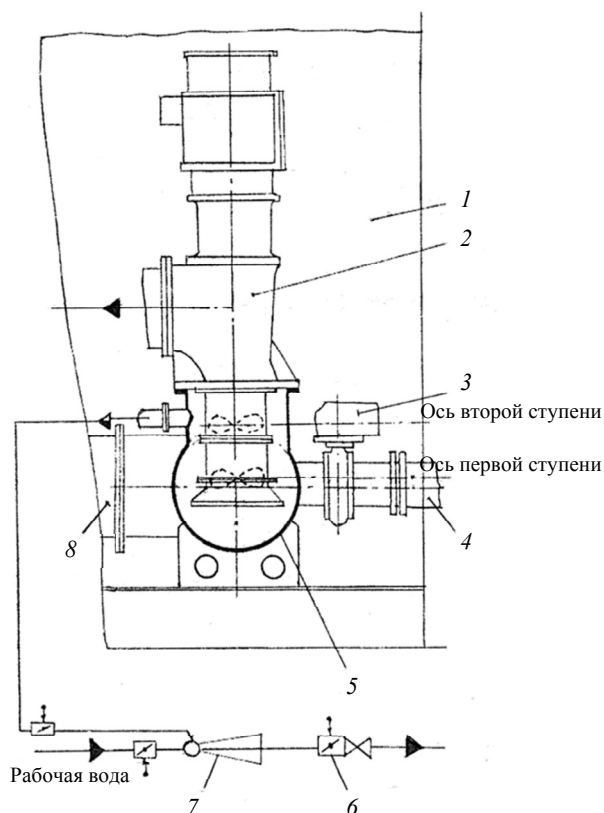
1 – ballast pump; 2 – water supply chamber; 3 – junction box; 4 – discharge pipeline; 5 – main pipeline; 6, 7, 8 – receiving pipelines; 9 – connecting pipeline; 10 – ballast receiving pipeline; 11, 12, 13, 17 – remotely controlled ship fittings; 14, 15, 16 – level alarms; 18 – ejector working water pipeline; 19 – discharge pipeline of the stripping system



**Рис. 3.** Размещение балластного насоса центробежного типа в насосном отделении плавучего дока: 1 – центробежный балластный насос; 2 – насосная камера; 3 – коллектор; 4 – клинкетная задвижка; 5 – приемный трубопровод; 6 – дно плавдока

**Fig. 3.** Arrangement of a centrifugal ballast pump in the pumping compartment of a floating dock: 1 – centrifugal ballast pump; 2 – pumping chamber; 3 – collector; 4 – wedge valve; 5 – receiving pipeline; 6 – bottom of the floating dock

граммы всплытия дока, на пути к насосу претерпевают многократные пространственные преобразования. Для обеспечения заданной скорости проведения судоподъемных операций балластные системы пла-



вучих доков оснащаются высокопроизводительными балластными насосами центробежного (НЦВ) или осевого (ОВ) типов, обладающими высоким КПД. Типовое размещение балластного насоса центробежного типа в насосном отделении плавучего дока согласно [6] приведено на рис. 3.

Конструкция коллекторной части балластной системы, с предусмотренной разделкой в верхней части коллектора в виде насосной камеры для монтажа на нем балластного насоса осевого типа ОВ6-38 [7], специально конвертированного из промышленного исполнения для применения в балластных системах плавучих доков, приведена в [8] и на рис. 4.

Балластные системы с высокопроизводительными насосами центробежного типа, которые функционируют в комплексе с осушительными системами, снабженными водоотливными эжекторами, имеют место и в плавучих буровых установках.

Указанные выше типы балластных доковых насосов НЦВ и ОВ весьма чувствительны к содержанию в трубопроводах воздуха, который проникает в приемные магистрали балластной системы при понижении уровня воды в балластных отсеках дока через вихревые воронки. Или, что еще более неблагоприятно по последствиям, это происходит посредством частичного или полного прохвата воздуха в приемные патрубки всасывающих трубопроводов – из-за дефицита подтока воды на периферии приемных патрубков в месте их размещения, неизбежно возникающего в соответствии с характеристиками, определенными в нормативном документе [4].

В результате общего снижения уровня жидкости в цистернах и, следовательно, уменьшения подпора среды на линии всасывания насосов (а главное – при поступлении воздуха в любой из приемных трубопроводов) движущийся поток жидкости на пути своего следования быстро насыщается воздухом и превращается в практически одно-

**Рис. 4.** Размещение балластного насоса осевого типа в насосном отделении плавучего дока: 1 – насосное отделение; 2 – осевой балластный доковый насос; 3 – дистанционноуправляемый поворотный затвор; 4 – приемный трубопровод балластного отсека; 5 – коллектор; 6 – путевая запорная арматура; 7 – водоотливной эжектор; 8 – трубопровод приема балласта из-за борта

**Fig. 4.** Arrangement of an axial ballast pump in the pumping compartment of a floating dock: 1 – pumping compartment; 2 – axial ballast dock pump; 3 – remote-controlled rotary gate; 4 – receiving pipeline of the ballast compartment; 5 – collector; 6 – track shut-off fittings; 7 – drainage ejector; 8 – ballast intake pipeline from overboard

родную аэрированную жидкую среду. При таком нарастающем процессе нарушения сплошности жидкости в рабочих колесах насосов возникают кавитационные явления, а затем, при еще достаточно высоком уровне балласта в отсеках (1–2 м и более), происходит резкое снижение КПД и подачи насосов, которое приводит к неминуемому срыву их нормальной безопасной спецификационной работы.

Исследования различных технических решений, используемых в зарубежной практике проектирования и эксплуатации балластных доковых систем различного типа в экспортных вариантах ремонтных плавучих доков – грузоподъемностью порядка 100 тыс. т, с высокопроизводительными насосами центробежного типа (подачей от 4 до 8 тыс. м<sup>3</sup>/ч) – также показали полную зависимость эффективности балластных насосов от подпора жидкости на всасывающем участке. Иными словами, это зависимость от уровня балласта в цистернах и степени аэрации жидкости от объемов проникающего воздуха в приемные трубопроводы, что присуще лопастным гидравлическим механизмам данного типа при отсутствии специальных сепарационных установок или устройств.

Вместе с тем, по условиям эксплуатации дока регулярно или периодически необходимо полное либо даже тщательное удаление остаточного балласта для использования полной спецификационной грузоподъемности дока, а также в процессах самодокования для ремонта собственных понтонов или при необходимости передислокации плавдока в укороченном варианте по условиям волнения в открытом море. В подобных случаях дальнейшая дебалластировка отсеков насухо выполняется посредством штатной осушительной системы с помощью вспомогательных переносных водоотливных и ручных средств. Продолжительность операций по обеспечению полного всплытия дока при этом многократно возрастает, т.к. производительность осушительных насосов обычно более чем на порядок ниже по сравнению с балластными.

К тому же в период проведения операций с доковой нагрузкой, близкой к максимальной, обеспечить равномерное распределение нагрузок в конструктивных связях корпуса дока практически неосуществимо, а длительность нахождения корпуса в неравномерном напряженном состоянии может привести к локальным разрушениям корпусных конструкций. Поэтому одной из важных задач, от решения которой зависят эффективность работы балластных насосов и системы в целом и сокраще-

ние спецификационного времени всплытия дока, является заблаговременное деаэрирование потока. Т.е. необходимо отсепарировать и удалить проникшие в водоводы массы воздуха отдельно от воды, пока они еще не достигли всасывающего патрубка балластного насоса и, таким образом, контролировать и ускорить процесс всплытия дока с нагрузкой.

Описание некоторых типов и особенностей балластных систем плавдоков, в т.ч. оснащенных разветвленной системой вакуумирования для обеспечения запуска и поддержания эффективной работы балластных насосов в заключительных стадиях дебалластировки отсеков, когда в приемные магистрали непредотвратимо начинают массово поступать пузырьки воздуха, содержится в [6]. Суммарная производительность вакуумных насосов в такой системе, согласно рекомендациям [6], должна быть порядка 5 % по отношению к общей подаче балластных насосов (некорректное сопоставление в известных публикациях, поскольку перекачиваемые среды разные). Следует отметить, что сложность такого принципа борьбы с аэрированной средой обусловлена разветвленностью и сложностью конструкций собственно систем вакуумирования, необходимостью наличия в их составе дополнительной специальной сепарационной емкости(тей), а также актуальностью автоматизации рабочих процессов. Поэтому широкого распространения вспомогательные системы с вакуумными насосами на плавдоках не получили.

В качестве одного из паллиативных способов повышения продолжительности работы доковых балластных насосов в заключительной стадии дебалластировки отсеков специалисты рассматривают введение дополнительного (нештатного) забортного трубопровода в коллекторную камеру. Такой трубопровод, по замыслу проектантов, позволит заместить часть всасываемого аэрированного потока и, таким образом, продлить работу балластного насоса в заключительных стадиях дебалластировки главным образом понтонных цистерн. Однако издержки таких приемов очевидны: возрастают конструктивные и, следовательно, стоимостные показатели, возникают необходимые дополнительные линии и связи дистанционного управления судовой арматурой, энергетические потери из-за «перекачивания моря» (хотя и частичного), появляется ряд других сопутствующих сложностей по сравнению с классическим составом балластной доковой системы.

В современный период с целью совершенствования балластных систем внутри коллекторов

и в водоводах в процессе проектных работ в некоторых случаях предусматривают различные устройства. Однако применение и эффективность таких конструктивных приемов не всегда оправдывается на практике, если предварительно не подтверждается экспериментально.

Сепарация различных перемещаемых насыщенных газом жидких сред, находящихся в различном агрегатном состоянии и вобравших в себя хаотические или упорядоченные движения пузырьковых структур, необходимая по условиям эксплуатации различных промышленных функциональных комплексов, систем и оборудования, издавна является серьезной технической проблемой. Она связана прежде со сложностью и своеобразием законов взаимодействия межмолекулярных сил в течениях газонасыщенных жидкостей, о чем подробно изложено в [9]. В данном труде приведены обобщенные уравнения динамики взаимодействия компонент в сплошной неоднородной среде.

Опубликованных теоретических или экспериментальных исследований структурных преобразований многофазных потоков в однофазные в судовых балластных системах и трубопроводах в обозримой ретроспективе изучения рассматриваемых проблем фактически нет. Причина сложившегося положения в этом разделе науки и техники объясняется в [9] недостаточной изученностью механизма межфазного взаимодействия в классической механике жидкости в гетерогенных (многофазных) средах.

Некоторые аналогии процессов перемещения двухфазных сред, посвященных аналитическим и экспериментальным исследованиям газожидкостных систем, в т.ч. в горизонтальных котельных паропроводах, отражены в работе [10]. Из зарубежных исследований в области гидротехники обращают на себя внимание эксперименты с различными конфигурациями водоподводов к высокопроизводительным насосам с целью повышения устойчивости их работы, осуществленные японскими специалистами.

В судостроении исследованием поведений аэрированных жидких сред в процессе выполнения проектных работ по совершенствованию судовых трюмных и балластных систем занимались известные ученые и специалисты: А.П. Безручко, В.А. Бензорук, Б.А. Вяльцев, Ю.А. Иванов, Л.А. Петраков, А.Г. Смирнов, В.Н. Соколовский, А.П. Фомин и др.

По мере развития науки и техники данная проблема в судостроении и гидротехнике примени-

тельно к конкретным условиям эксплуатации разрешалась с помощью разнообразных по конструкции, сложности водоводов и устройств, порой весьма необычных. В основе конструкций множества существующих сходных промышленных аппаратов и установок используются несколько известных, зачастую взаимосвязанных физических явлений, а именно: естественная гравитационная флотация жидкостных смешанных составов, механическое разделение сред с различным удельным весом путем воздействия центробежных сил внутри аппаратов, изменение давления (искусственное применение перепадов давления) в емкостях в целом или на отдельных участках последних. Необходимо упомянуть также непосредственную механическую фильтрацию. Разумеется, применяются и комбинированные воздействия на молекулярную структуру смешанных жидких сред, с целью более эффективного разделения их на самостоятельные фазы и объемы.

Применяемые принципы и распространенные методы разделения устойчивых гетерогенных составов содержатся, например, в работе [11]. В качестве типовых примеров судового оборудования, в которых осуществлялось достаточно надежное разделение двухфазных сред с помощью флотации, фильтрации или воздействия центробежных сил, могут служить отечественные нефтеводяные сепараторы типа СК (флотация с ускорением процессов с помощью разрежения жидкого состава, коалесценция), отраженные в [12], а также сепарационные установки типа УСА (центрифугирование) и гидродиклоны по [13].

Сепараторы, в которых отделение происходит под влиянием инерционных сил, на практике именуют инерционными. В таких аппаратах разделение сред происходит при резком изменении направления многофазного потока, благодаря установленным специальным отражающим элементам.

В мировой судостроительной практике различные сепарационные установки и аппараты разной сложности и степени автоматизации применяются в балластных системах грузовых судов [14] и некоторых плавучих буровых установок для надежного запуска и повышения эффективности высокопроизводительных насосов, особенно на заключительных стадиях дебалластировки цистерн. В судовых системах пароснабжения для водоподготовки с целью повышения эффективности и ресурса штатного оборудования тоже используются штатные сепараторы пара и деаэраторы. Последние отличаются чрезвычайной насыщенностью и сложностью кон-

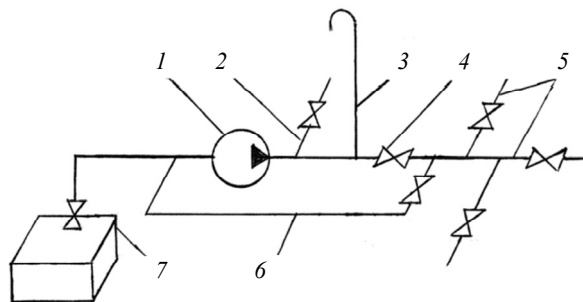
струкций внутренних устройств [15], обусловленной главным образом специфическим функциональным назначением (выделение и удаление молекул газов, растворенных в воде). Вместе с тем, некоторые конструктивные решения в ступенях отделения газов в судовых деаэраторах могут представлять интерес и для совершенствования конструкций водоводов балластных систем плавучих доков.

Проблемами совершенствования рассматриваемых процессов сепарации многофазных жидкостей в разные годы серьезно занимались в зарубежном и отечественном судостроении. Исследования в этой области показывают, что судовые установки и аппараты, как правило, снабжают для применения их в процессе их повседневной или периодической эксплуатации на судах. На основе исследований и научных достижений применялись различные подходы, оборудование и средства. Один из вариантов судовой балластной системы с улучшенными свойствами (рис. 5) предложен в [16].

Описания и иллюстрации ряда сложных серийных судовых и промышленных сепарационных установок, применяемых технологий обработки многофазных потоков, используемых в них для сепарации потоков технических решений, а также достоинства и недостатки того или иного конструктивного исполнения популярных сепарационных устройств подробно рассмотрены в [11].

При создании сепарационных устройств по технологическим соображениям чаще всего прибегают к цилиндрической форме корпуса. В свою очередь, цилиндрические сепарационные аппараты по форме и положению в пространстве подразделяются на горизонтальные и вертикальные. В гидротехнике же водоподводящие насосные камеры по технологическим соображениям выполняют железобетонными и, как правило, выбирают форму прямоугольного поперечного сечения.

В современных балластных доковых системах применяются обе разновидности сборно-распределительных устройств. В качестве горизонтальных обычно используют коллекторы кругового (рис. 3 и 4), реже – прямоугольного поперечного сечения. Функционально главное назначение коллекторов при погружении плавучего дока состоит в приеме балласта из-за борта и распределении его по приемным трубопроводам в обслуживаемые балластные отсеки. При всплытии плавдока – в суммировании потоков балласта, откачиваемого из балластных отсеков одновременно или селективно по приемным трубопроводам (магистральным и отсечным) балластной системы (рис. 2).



**Рис. 5.** Балластная система для судов:  
1 – балластный насос; 2 – отливной трубопровод;  
3 – разгрузочный трубопровод; 4 – запорный клапан;  
5 – распределительные трубопроводы;  
6 – байпасный трубопровод; 7 – кингстонный ящик

**Fig. 5.** Ballast system for ships:  
1 – ballast pump; 2 – discharge pipeline; 3 – unloading pipeline; 4 – shut-off valve; 5 – distribution pipelines; 6 – bypass pipeline; 7 – sea chest

При этом должно учитываться важное требование – максимально компактное размещение коллекторной части балластной системы в насосном отделении, т.к. развитие объемов «сухих» насосных отделений при заданных главных размерениях плавучих доков идет в ущерб их грузоподъемности. Минимальное расстояние между осями приемных трубопроводов в местах их ввода в коллектор лимитируется главным образом номинальными диаметрами (DN) приемных трубопроводов, поперечными габаритами путевой дистанционно-управляемой арматуры (поворотными затворами или клинкетными задвижками) и необходимыми спецификационными зонами для монтажа и обслуживания арматуры. В качестве вертикальных исполнений водоводов используют преимущественно водоподводящую камеру, в верхней части которой устанавливается непосредственно балластный насос (рис. 3 и 4).

Вопросы совершенствования оборудования балластных систем плавучих доков и выбора оптимальной конструкции коллекторов, насосных камер или иных типов водоводов аналогичного назначения для определенных условий эксплуатации для повышения эффективности балластных насосов весьма актуальны для проектантов. Необходимость анализировать эффективность применения той или иной схемы сепарации и отведения воздуха из водоводов системы на стадиях жизненного цикла рассматриваемых плавсооружений постоянно возникает перед конструкторами и эксплуатирующими организациями при новом проектировании или в процессах модернизационных работ.

Аналитические и экспериментальные исследования в рассматриваемой области науки и техники, выполненные Крыловским центром и АО «ЦМКБ «Алмаз» совместно с Государственным морским техническим университетом (ГМТУ), приоткрыли завесу над некоторыми закономерностями поведения азрированных потоков внутри коллекторов балластной системы плавдоков, на переходах из приемных трубопроводов в коллекторную часть, где происходят слияние и активное перемешивание потоков, а также непосредственно в насосной камере. Благодаря этому удалось ответить на ряд специфических проектных вопросов, периодически возникающих в процессе выбора или принятия рациональных конструктивных решений в балластных доковых системах.

Приведенные описания различных принципиальных схем и конструкций показывают, что коренной причиной в обеспечении эффективной работы балластных насосов является совершенство конструкции насосной камеры и коллектора (по сути, водоводов), выполненных подобно изображенным на рис. 3 и 4. В рассмотренных системах для ускорения процессов сепарации и повышения эффективности разделения азрированной воды на фазы дополнительно применяют системы, содержащие преимущественно струйные аппараты – эжекторы по типу [17]. Это решает проблему универсальности за счет совмещения балластной и осушительной систем

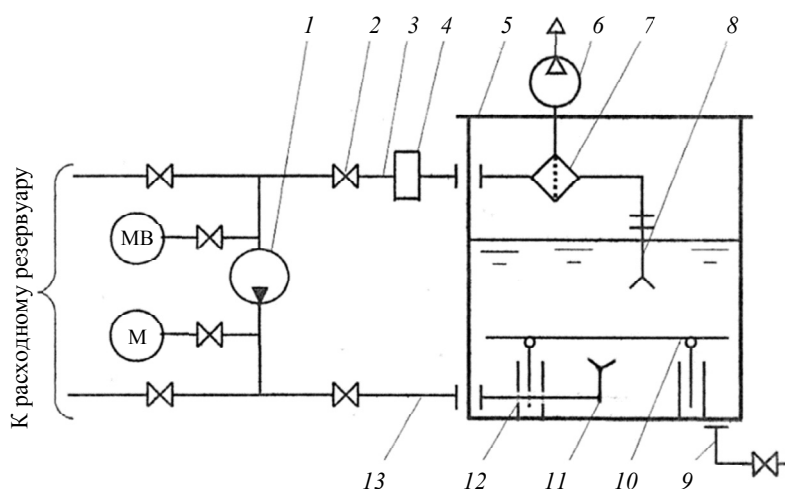
и снижает «чувствительность» балластной системы к азрированному потоку.

Поэтому в настоящей работе представлены результаты исследований поведения двухфазных потоков внутри современных унифицированных конструкций, содержащих вспомогательные элементы разделителей смешанного потока на самостоятельные фазы. Несложно представить при этом, что типичность данных технических решений обусловлена преимущественно ограниченным типом используемых в плавдоках балластных насосов отечественного производства, отмеченных ранее.

## Экспериментальное оборудование и методы испытаний

### Experimental equipment and test methods

Исследование процессов поведения потоков двухфазных жидкостей и ряда возможных методов управления процессами разделения азрированного потока на самостоятельные фазы в условиях коллекторов и насосных камер балластных доковых систем осуществлялось на универсальной экспериментальной установке для исследования эффективности и надежности оборудования судовых систем и трубопроводов, описание которой содержится в работе [18]. Принципиальная схема и общий со-



**Fig. 6.** Schematic diagram of equipment arrangement and components of the experimental installation for study of effectiveness of devices and items of ship systems and pipelines: 1 – centrifugal pump; 2 – track fittings; 3 – suction pipeline; 4 – flow meter; 5 – changeable working section of the experimental installation; 6 – vacuum pumping unit; 7 – tested equipment unit (full-scale prototype or model); 8 – receiving device; 9 – drainage pipeline; 10 – movable bottom; 11 – distribution pipeline; 12 – pivot-screw rack support; 13 – pressure pipeline

**Рис. 6.** Принципиальная схема и общий состав оборудования экспериментальной установки для исследований эффективности аппаратов и изделий судовых систем и трубопроводов: 1 – центробежный насос; 2 – путевая арматура; 3 – всасывающий трубопровод; 4 – расходомер; 5 – переналаживаемый рабочий участок экспериментальной установки; 6 – вакуумный насосный агрегат; 7 – испытываемый аппарат (натурный образец или макет); 8 – приемное устройство; 9 – осушительный трубопровод; 10 – подвижное дно; 11 – распределительный трубопровод; 12 – опора шарнирно-винтовой стойки; 13 – напорный трубопровод



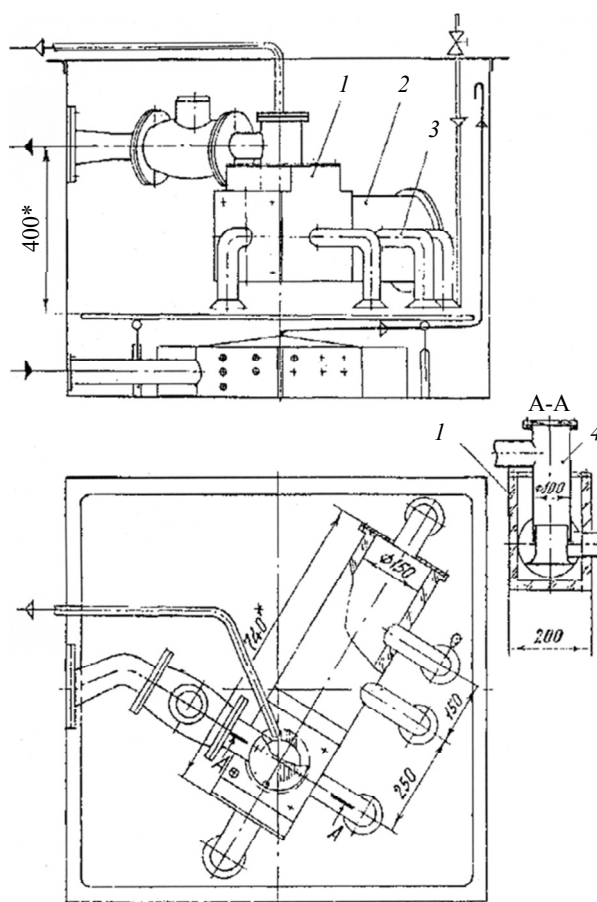
став комплектующего оборудования данной установки приведены на рис 6.

Комплекс работ предусматривал испытания модифицируемых макетов, охватывающих традиционно применяемые типы насосных камер и коллекторов балластной системы плавучих доков, с некоторыми применяемыми на практике конструктивными элементами сепарационных устройств. Схемы и габариты выполненных макетов насосной камеры и коллектора с приемными трубопроводами, размещенных на рабочем участке испытательной установки, приведены на рис. 7.

Макеты насосной камеры и коллектора для удобства визуальных наблюдений качественных картин и регистрации гидравлических процессов выполнены прочными, герметичными и прозрачными. А для корректного моделирования происходящих во внутренних полостях водоводов процессов они дополнительно снабжены макетами приемных отрошков балластной системы и фрагментами силового набора днищевой части балластных отсеков. Таким образом, предоставлялась возможность моделировать процессы поступления и взаимодействия потоков, реализующихся в балластной системе плавучего дока, в отдельно взятом насосном отделении при операциях дебалластировки отсеков.

Программа эксперимента предусматривала последовательные испытания макета коллектора совместно с приемными трубопроводами, макета насосной камеры, макета осевого и отчасти (при демонтаже макета корпуса осевого насоса) центробежного насосов на рабочем участке гидравлического стенда, т.е. в прямом порядке и последовательности на пути потоков жидкости от периферии приемных устройств до балластного насоса. Размещение смонтированных макетов насосной камеры и коллектора с приемными трубопроводами балластной системы плавучего дока и вспомогательного оборудования на рабочем участке экспериментальной установки показано на рис. 8.

Рабочий участок экспериментальной установки позволял выполнять достаточно обширные исследования конструктивного совершенства полостей рассматриваемого гидравлического оборудования и элементов их насыщения. Кроме того, он обеспечивал приемлемые условия моделирования процессов протекания несжимаемой (азрированная – это условно несжимаемая) жидкости внутри проточных полостей насосной камеры и коллектора, выделенных из общего состава оборудования балластной системы плавучего дока в качестве значимых конструкций как для основного назначения, так и для



**Рис. 7.** Схема компоновки макета насосной камеры и коллектора с приемными трубопроводами балластной системы плавучего дока на рабочем участке экспериментальной установки:

1 – макет насосной камеры; 2 – макет коллектора, сопряженного с насосной камерой; 3 – макет приемного трубопровода; 4 – макет осевого балластного насоса

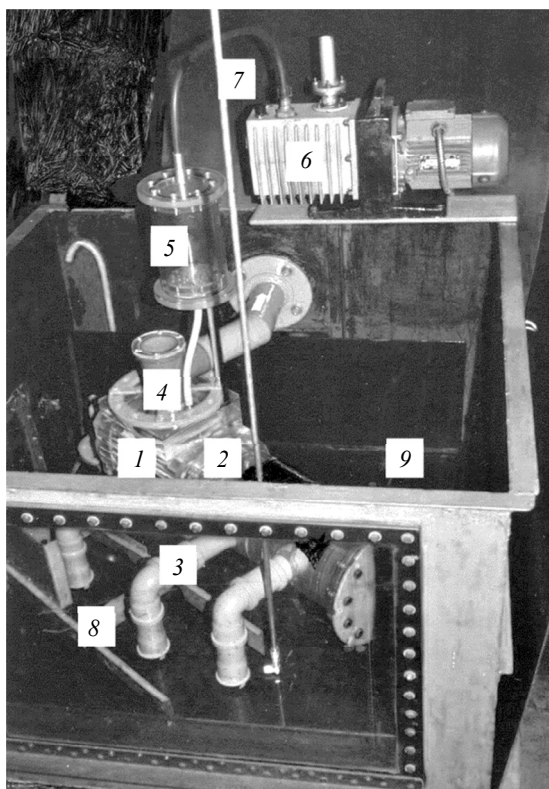
**Fig. 7.** Layout diagram of model pumping chamber and collector with receiving pipelines of the floating dock ballast system at the working section of experimental installation:

1 – the pumping chamber model; 2 – collector coupled with the pumping chamber model; 3 – receiving pipeline model; 4 – axial ballast pump model

борьбы с азрированными потоками воды, поступающими по приемным трубопроводам.

Критерии моделирования определялись в соответствии с методологией классической теории размерностей [19]. Масштаб исследуемых макетов, размещаемых на рабочем участке гидравлического стенда, был определен с учетом соблюдения критериев подобия  $Re$  и  $Sh$  и составлял приблизительно 1:5 по отношению к диаметрам приемных трубопрово-

дов балластных систем. Целесообразно упомянуть, что усовершенствования многочисленных объектов и различных составных изделий, входящих в судовые балластные системы и полученных ранее таким



**Рис. 8.** Общий вид смонтированных макетов насосной камеры и коллектора с приемными трубопроводами балластной системы плавучего дока и вспомогательного оборудования на рабочем участке экспериментальной установки:

1 – прозрачный макет насосной камеры; 2 – прозрачный макет коллектора; 3 – приемный трубопровод; 4 – имитационная модель осевого насоса; 5 – вспомогательная сепарационная емкость; 6 – вакуумный агрегат; 7 – воздушный трубопровод; 8 – трансформируемый макет конструктивного набора балластного отсека; 9 – регулируемое подвижное дно рабочего участка экспериментальной установки

**Fig. 8.** General view of the mounted models of the pumping chamber and collector with receiving pipelines of the ballast system of the floating dock and auxiliary equipment at the working section of the experimental installation:  
1 – transparent model of the pumping chamber; 2 – transparent model of the collector; 3 – receiving pipeline; 4 – simulation model of the axial pump; 5 – auxiliary separation tank; 6 – vacuum unit; 7 – air pipeline; 8 – transformable model of the structural set of the ballast compartment; 9 – adjustable movable bottom of the working section of the experimental installation

же экспериментальным способом, в последующем получили подтверждение их эффективности в реальных условиях эксплуатации оборудования.

Отметим также некоторые характерные особенности операций, проявившиеся закономерности и важные нюансы испытаний. Обращаясь к рис. 3 и 4, можно видеть, что приемные трубопроводы традиционно подводятся к коллектору в горизонтальной осевой плоскости по нормали к его образующей для рационального размещения и обслуживания путевой арматуры. Этот конструктивный нюанс, соответственно, предусмотрен и в макете коллектора. Модификация во внутренней части макета насосной камеры заключалась в изменении внутреннего сечения последней в плане и по вертикали, а также в изменении высоты (заглубления) всасывающего патрубка имитационного макета насоса.

Использование центробежного балластного насоса имитировалось посредством демонтажа в насосной камере всасывающего патрубка для соблюдения схемы компоновки, показанной на рис. 3. Конструктивные преобразования в коллекторной части макета, в полости которого стекается и дополнительно интенсивно перемешивается аэрированный жидкий балласт, предусматривались преимущественно в области варьирования конструкций вводов приемных трубопроводов непосредственно в коллектор. Кроме того, варьировались количество и места размещения приемных трубопроводов путем селективного одиночного, парного в комбинированных сочетаниях или их последовательного попеременного подключения (с помощью установления или снятия специальных заглушек) либо путем задействования одновременно всех приемных отрезков.

Опытным путем анализировались целесообразность различных применяемых на практике разделок приемных трубопроводов внутри как коллектора, так и приемных трубопроводов, вводимых непосредственно в насосную камеру (магистрального из смежного насосного отделения или по кратчайшему пути из балластного отсека, расположенного рядом, за продольной непроницаемой переборкой понтона).

В процессе предварительных опытов с рядом модификаций положения макетов, путем расположения их с небольшими уклонами относительно горизонтали, для определения влияния допустимого крена или дифферента плавучего дока в процессе грузоподъемных операций, не были выявлены принципиальные отличия в процессах внутреннего

взаимодействия гетерогенных пространственных потоков. Поэтому в дальнейших исследованиях за основу принят рассматриваемый комплекс макетов, установленных по уровню горизонтально, имеющих вертикально расположенную насосную камеру с внутренней полостью кругового сечения в плане, т.е. цилиндрического типа. Таким образом, учтено и сравнительно широкое применение подобных конструкций в промышленных установках сходного назначения. Монтаж макетов контролировался по уровню в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Положение подвижного дна рабочего участка фиксировалось в соответствии с заданным кольцевым зазором для приемных патрубков с типовыми конструкциями периферийных участков (раструбов) всасывающих трубопроводов.

Макет конструктивного набора снабжен возможностью варьирования шпаций и размещался таким образом, чтобы задействованный приемный патрубок по возможности находился в центре одной из смежных шпаций набора. Такое размещение гарантированно обеспечивало возникновение естественной устойчивой вихревой воронки, образующейся в толще воды, через которую воздух снаружи поступал в приемный отросток, что было ранее многократно апробировано и однозначно установлено в [18]. Кроме того, испытательный стенд и масштабный макет фрагментов балластного отсека, содержащего конструктивные связи, позволяли в соответствии с программой испытаний принудительно вводить определенные порции воздуха от магистрали рабочего воздуха как непрерывно, так и дозированно, через отростки приемных трубопроводов со всех сторон по периферии приемных раструбов.

Замеры параметров потоков производились при установившихся режимах работы насоса на участке трубопроводов установки, где поток был сплошным. Стабилизация режимов работы установки достигалась путем рециркуляции жидкости на рабочем участке экспериментальной установки, установившихся гидравлических процессов, а также с учетом равномерного дозированного поступления объемов сепарируемого воздуха в приемные трубопроводы. С целью защиты насоса, обеспечивающего работу экспериментальной установки от выхода из строя, в составе установки предусмотрен вакуумируемый сепаратор (рис. 8, поз. 5), который снабжен отдельным трубопроводом, соединенным с макетом насосной камеры. Так моделировались схема работы и режимы вакуумирования среды в насосной камере при наличии в составе балластной системы вспомогательной системы.

Скорость потока определялась на контрольном участке – в выпускном трубопроводе из насосной камеры макета. При необходимости скорость потока определялась как в приемных отростках, так и во всасывающем патрубке модели осевого насоса с помощью измерительных технических средств. Скорость в выпускном патрубке из насосной камеры, т.е. во всасывающем патрубке модели насоса, варьировалась от начальной нулевой отметки до регламентной для насосов 2 м/с и более, с определенным интервалом и точностью измерения в 0,1 м/с.

Скорость потока в приемных отростках доходила до экстремальных 4 м/с, что в практике дебалластировки отсеков может иметь место при отключении отдельных или сразу нескольких приемных отростков трубопроводов, примыкающих к всасывающей магистрали разветвленной балластной системы плавучего дока линейного и кольцевого типов. Изменение скоростей потоков осуществлялось с помощью регулирования подачи насоса на напорной магистрали, а значения скорости во всасывающем патрубке насоса определялись по расходомеру с достижимой точностью 0,1 м/с. Давление вакуумирования варьировалось от нуля до  $P = -50$  КПа.

Экспериментальный стенд, снабженный прозрачными окнами, позволял без ограничений вести всесторонние наблюдения за внутренними процессами и явлениями, которые осуществлялись как визуально, сквозь прозрачные стенки корпусов макетов насосной камеры и коллектора при естественном освещении, так и с помощью контрольной рефлекторной подсветки, при необходимости в поляризованном свете. Линии токов, когда это было нужно, определялись съемками происходящих процессов с различными скоростями по естественно формирующимся траекториям мелких пузырьков.

С учетом отмеченных особенностей балластных систем плавучего дока и возможностей экспериментальной установки первыми подверглись испытаниям макеты без внутренней «начинки» и отклонений от типовых конструктивных решений, используемых на практике. После завершения этапа общей программы испытаний и отработки макетов, а также определения необходимых режимов потоков и приемлемых условий испытаний макеты модифицировались, прежде всего для исследований влияния применяемых на практике типовых внутренних устройств для разделения воздуха и жидкости. Для этого на рабочем участке

осуществлялась очередная модификация внутренних устройств макетов.

В соответствии с существующей классификацией [20] измерения параметров сред (скорость потоков, расхода воздуха и значений вакуумирования, размеров пузырьков) относятся к простым равноточным. Для данного типа измерений вполне применим принцип арифметического среднего как частного случая метода наименьших квадратов. Доверительный интервал определяется по функции нормального распределения. Количество измерений рассчитывалось по методике [20], исходя из доверительной вероятности 95 %, и составляло не менее 10.

### **Комплексные гидравлические испытания макетов насосной камеры и коллектора с приемными трубопроводами балластной системы плавучего дока**

Complex hydraulic tests of the pumping chamber and collector models with receiving pipelines of the floating dock ballast system

Предварительные испытания продемонстрировали широкие возможности экспериментальной установки и макетов оборудования балластных систем плавучих доков в моделировании и исследовании процессов сепарации воздуха, поступающего по всасывающим магистралям, т.е. в избыточно аэрированном пространственном потоке воды, в относительно стесненных по условиям эксплуатации емкостях (ими, как упоминалось выше, являются насосные камеры и коллекторные участки балластных систем плавучих доков), с применением известных технических решений.

Опыты показали, что оптимальным рабочим диапазоном давлений вакуумирования является  $P = -(20-30)$  КПа. Этот важный аспект, в частности, не противоречит средним показаниям, отраженным в спецификации известной сепарационной установки фирмы Thune-Eureka A/S [21]. Повышение значения вакуумирования выше отмеченного диапазона приводит к уменьшению диаметра пузырьков, хаотическому их распространению по всему объему жидкости во внутренней полости коллекторного участка и насосной камеры балластной системы плавучего дока и усложнению процесса их выделения. Понижение разрежения по отношению к означенному диапазону давлений вакуумирования отрицательно влияло как на скорость выделения и всплытия пу-

зырьков, так и на процессы их слияния. Поэтому в процессе основной части экспериментальных исследований в верхней полости макета насосной камеры поддерживалось заданное разрежение.

Учитывая полученные результаты предварительных экспериментов, последующие испытания внутренних устройств для выделения воздушной фазы из смешанных пространственных потоков осуществлялись последовательно, поэлементно или фрагментарно, принимая во внимание особенности конструкций и складывающихся картин процессов.

Применяемые в известных технических решениях отечественные разработки (в т.ч. варьирование сечений – прямоугольное или круговое – насосной камеры и коллекторной части, расположение по высоте относительно оси коллектора и разделка впускных отверстий примыкающих к коллектору приемных трубопроводов, разнесение последних по разным уровням и под определенными углами в горизонтальной плоскости, различные разделения внутренних полостей), подобно тому, как это продемонстрировано при испытаниях судовых сепарационных установок и устройств в работе [11], оказались неэффективными при скоростях потока на контрольном участке – в выпускном сечении (отверстии) коллектора или в выпуске из трубопровода магистрали смежных отсеков, т.е. на входе в вакуумируемую насосную камеру, свыше 0,5 м/с.

Примечательным аспектом, если это может быть важным на практике, явилось лишь некоторое снижение зависимости процессов удаления воздуха из воды при определенных отклонениях насосной камеры от вертикальной оси (наклонная в одной или двух плоскостях или вообще «кривая» конструкция насосной камеры), что объяснимо инерционными факторами. Но в подобных случаях, гипотетически возможных, как отмечено при исследовании влияния крена и дифферента в процессе докования, однако нетипичных с точки зрения вариантов исполнения оборудования балластной системы, поведение потоков внутри наклонной конструкции насосной камеры оказалось непрогнозируемым. Определить, например, эффективность отмеченных или иных «экзотических» беспредельно вариативных конструкций без специальных исследований представляется трудноосуществимым.

В процессе исследований макет модифицировался не только для оценки существующих конструкций, предназначенных, по замыслам конструкторов известных аппаратов (рис. 3 и 4),

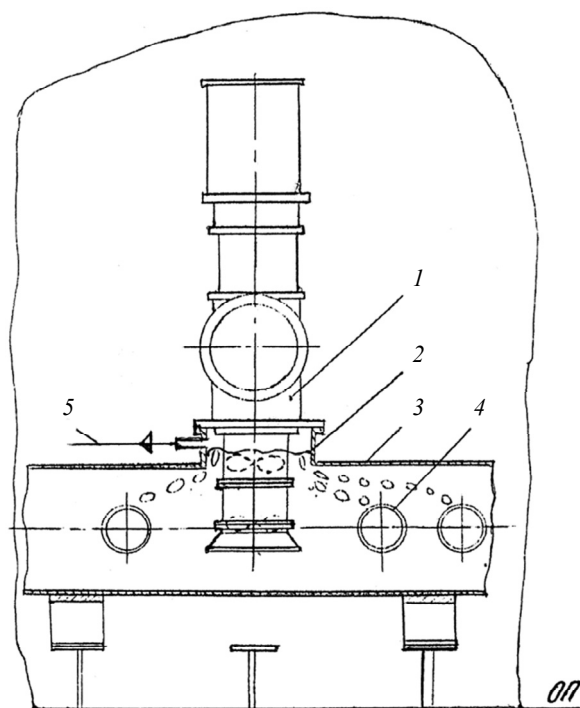
управлять эффективностью процессов разделения структур смешанных потоков жидких и газообразных сред, но и для достижения оптимальных конструктивных решений по результатам всего комплекса испытаний.

Наиболее совершенные разработки коллекторной части и насосной камеры балластных систем плавучих доков рассмотрены в [8]. В этих аппаратах необходимое разрежение с целью удаления поступившего в водоводы азрированного балласта и осушения балластных отсеков в заключительной стадии дебалластировки создается с помощью эжектора. При разработке таких систем специалисты зачастую исходят из предположения, что благодаря размещению приемного патрубка насоса в нижней части водоподводящей камеры, сообщаемой с коллектором, можно естественным способом разделить поток воды и воздуха, который попадает в приемные трубопроводы через вихревые воронки или при непосредственном прохвате значительных порций воздуха на периферии приемных раструбов. Гипотетически полагают, что таким образом балластный насос будет всасывать воду в нижней части насосной камеры, а воздушно-жидкостная смесь, скапливающаяся и перемещающаяся в верхней части коллектора, будет удаляться из насосной камеры эжектором осушительной системы (рис. 4), менее «чувствительным» к относительно несплошной жидкой среде, типа предусмотренного в [17].

При испытании конструкций водоводов рассматриваемого типа установлено, что процессы сепарации внутри замкнутых емкостей, подобно описанной в [11], далеко не всегда происходят по привычным логическим представлениям и гипотетическим схемам. Чем сложнее внутреннее устройство оконечной емкости на пути к насосу, тем более непредсказуемы картины происходящих процессов.

Апробация показала, что при скоростях потоков в приемных трубопроводах в пределах 0,5 м/с выделение и слияние воздушных пузырьков происходит приблизительно по упрощенным логическим схемам (рис. 9), описанным в работе [11].

Однако на этих крайне низких режимах скоростей потоков для балластных доковых систем аналогия с картинами процессов (рис. 9), к сожалению, заканчивается. Наиболее характерные проявляющиеся и представляющие практический интерес схемы или фрагменты процессов, реализующихся внутри коллектора и насосной камеры при различных скоростях потоков в приемных трубо-



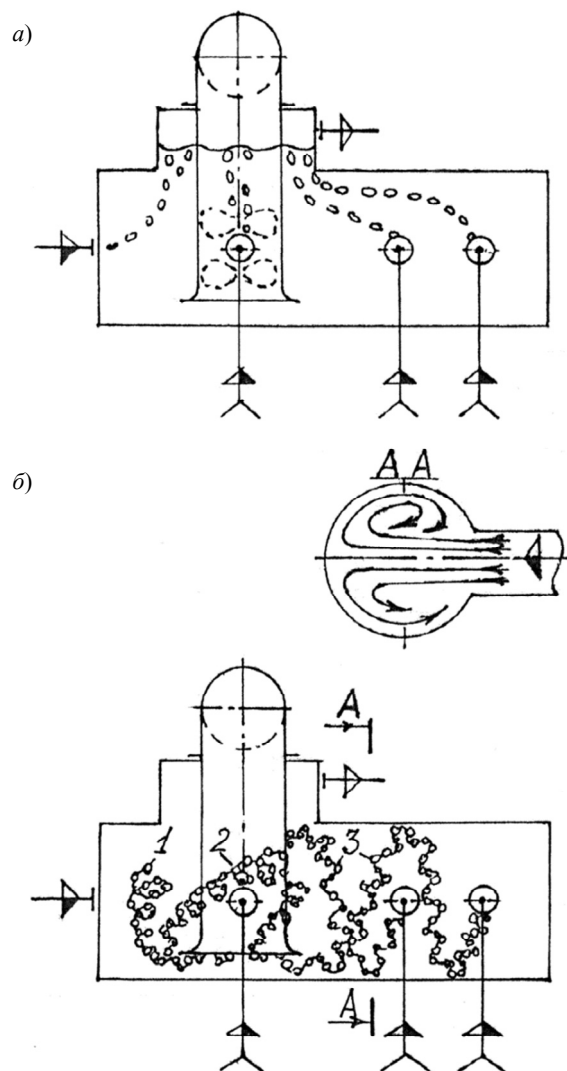
**Рис. 9.** Процесс выделения воздуха в коллекторе балластной системы плавучего дока при скоростях потоков на выпуске из приемных трубопроводов в пределах 0,5 м/с: 1 – балластный насос осевого типа; 2 – насосная камера; 3 – коллектор балластной системы; 4 – приемный трубопровод; 5 – отвод эжекторного трубопровода

**Fig. 9.** The process of air release in the collector of the floating dock ballast system at flow rates at the outlet from the receiving pipelines within 0.5 m/s: 1 – axial type ballast pump; 2 – pumping chamber; 3 – ballast system collector; 4 – receiving pipeline; 5 – discharge of the ejector pipeline

проводах (соответственно, и в коллекторе), в зависимости от параметров пространственных потоков, внутренних условий и применяемых конструктивов, а также краткие описания характерных явлений, происходящих в полостях рассматриваемых конструкций при различных условиях и модификациях, в схематическом виде представлены на рис. 10.

На рис. 10а, а также рис. 11 и 12 (см. вклейку) приведен ряд фрагментов течений и процессов произвольного выделения пузырьков воздуха, поступающего по разным приемным трубопроводам со скоростью потока в пределах 0,5 м/с, индивидуально в каждом из них, при их комбинированном или одновременном подключении (рис. 11) и поступлении воздуха сразу по всем приемным трубопроводам.

При скоростях потоков в приемных трубопроводах на входе в коллектор и внутри коллектора свыше 0,6 м/с процессы самопроизвольного выделения воздушной составляющей и жидкого балла-



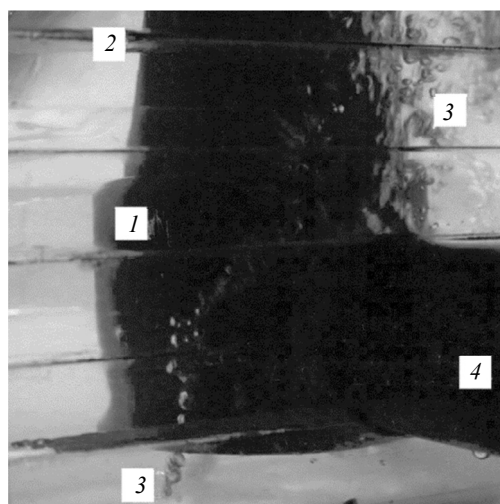
**Рис. 10.** Схемы и фрагменты реализующихся в контурах насосной камеры и коллектора балластной системы плавучего дока гидравлических процессов, в зависимости от внутренних условий и локальных параметров пространственных потоков: а) при скоростях потоков в приемных трубопроводах в пределах 0,5 м/с; б) при указанных скоростях свыше 0,5 м/с

**Fig. 10.** Diagrams and fragments of hydraulic processes forming in the contours of the pumping chamber and collector of the floating dock ballast system, depending on internal conditions and local parameters of spatial flows: а) at flow rates in the receiving pipelines within 0.5 m/s; б) at specified speeds over 0.5 m/s

ста сразу нарушились. Логично ожидаемый переходный период не проявлялся.

Необходимо отметить, что приемный трубопровод, подводимый непосредственно в приемную камеру насоса (рис. 10б, нижний левый), именуемый условно центральным, является самым слабым местом – вопреки наличию очевидной возможности в данном случае рационально использовать внутреннее пространство насосного отделения для прямого подвода по кратчайшему пути одного из приемных трубопроводов.

На самом деле такое размещение приемного трубопровода оказывается наиболее надежным каналом для непосредственной доставки воздуха в зону приемного раструба насоса и сразу блокирует работу последнего при поступлении через вихревую воронку в приемный трубопровод первой «солидной» порции воздушной массы. Набегающий по центральному приемному трубопроводу нижний поток сплошной воды частично всасывается сразу, а частично обтекает периферийную раструбную часть внутренней трубы, имитирующей корпус насоса, и всасывается по бокам (рис. 13). Высвободившаяся из приемного трубо-



**Рис. 13.** Образование и вовлечение пузырьковых вихрей у основания насоса при поступлении аэрированного потока из центрального трубопровода со скоростью более 1 м/с: 1 – корпус насоса; 2 – насосная камера; 3 – пузырьковый вихрь; 4 – центральный приемный трубопровод

**Fig. 13.** Formation and involvement of bubble vortices at the pump base at ingress of aerated flow from the central pipeline at a speed of more than 1 m/s: 1 – pump housing; 2 – pumping chamber; 3 – bubble vortex; 4 – central receiving pipeline

провода аэрированная масса воды тоже отражается от корпуса насоса и образует систему из нескольких интенсивных вихрей, предельно насыщенных пузырьками (рис. 10б).

Парные вихри спонтанно возникают почти одновременно в коллекторе и насосной камере и циркулируют в толще воды по наклонно-спиралевидным траекториям, бессистемно перемещаясь в промежуточной полости между двумя цилиндрами, практически симметрично по обе стороны от корпуса модели насоса. Основания этих пузырьковых вихрей уходят во всасывающий патрубок насоса (рис. 14, см. вклейку).

Отдельный, более опасный с точки зрения проникающей способности, пузырьковый вихрь простирается справа налево во фронтальной проекции и сверху вниз по диагонали, занимая круговой сектор свыше  $100^\circ$ , и, огибая сверху поток аэрированной воды, поступающий из центрального приемного трубопровода, входит в раструб насоса с противоположной стороны от коллектора (рис. 10б).

Сущность сложных процессов, происходящих в насосной камере, в известной мере проясняется на основе анализа гидромеханики подобных течений несжимаемой жидкости. Двухфазный поток жидкости, высвобождающийся из центрального приемного трубопровода, может быть приближенным образом отождествлен с турбулентной затопленной струей, истекающей из источника круглого поперечного сечения в бесконечное пространство, подобно рассмотренной в классических исследованиях [9].

Однако при этом имеет место ряд отличий, которые обусловлены более сложными конструктивными факторами, существенно влияющими на формирование струи и, соответственно, реализацию картин течений в пространстве типовой насосной камеры. Принципиальным отличием является то, что струя из концевой участка приемного трубопровода на входе в насосную камеру истекает из отверстия в вертикальной цилиндрической емкости конечных размеров – диаметра и высоты. В этом случае срез выпускного участка приемного трубопровода уже совершенно не плоский. Кроме того, внутри емкости соосно установлен цилиндр (труба), моделирующий корпус осевого насоса, с зазорами: кольцевым относительно дна и между образующими (стенами) цилиндров (рис. 7), соизмеримыми с сечением струи.

Исток поступающей жидкости из такой емкости с двойными соосными цилиндрическими стенками осуществляется через внутреннюю трубу, срез ко-

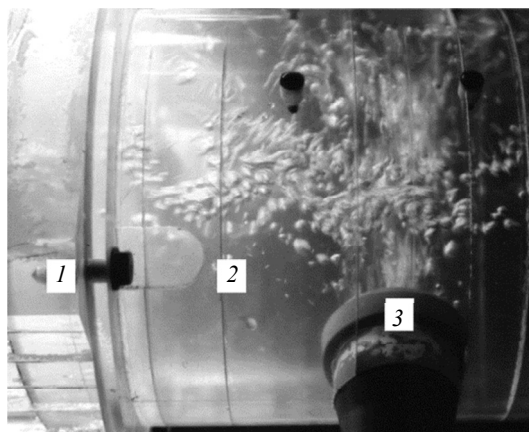
торой расположен ниже приемного трубопровода. Варьирование соотношений диаметров насосной камеры относительно диаметра корпуса насоса, т.е. кольцевого зазора между ними, в пределах 25 %, а также кольцевого пространства между корпусом камеры и раструбом насоса в тех же пределах, заметных невооруженным глазом положительных изменений в картины турбулентных потоков, сопровождающихся интенсивными вихревыми явлениями, не привносит. Пузырьковая вихревая структура лишь увеличивается в объеме в горизонтальных радиальных сечениях.

Из этой серии опытов явственно проистекает, что конструкция насосной камеры имеет большое значение для обеспечения эффективности работы балластного насоса и развития ее пространства. Несовершенства могут отрицательно отразиться на обеспечении КПД и спецификационных характеристик судовых гидравлических лопастных механизмов, которыми являются балластные насосы типа НЦВ и ОВ, традиционно применяемые в балластных доковых системах, особенно в заключительных стадиях дебалластировки доковых балластных отсеков. Рациональная конструкция насосной камеры при этом, с учетом (что тоже важно) их общего количества на плавсооружении, должна не просто конструироваться на основе умозрительных и практических соображений, а обрабатываться расчетным и подтверждаться экспериментальным путем – подобно тому, как это выполняют и добиваются оптимальности конструкций упомянутые ранее японские специалисты-гидротехники.

Внутри коллектора формируются не менее сложные картины течений, визуально наблюдаемые по цепочкам движущихся пузырьков сквозь прозрачные стенки макета. Поступающие по приемным трубопроводам аэрированные потоки в полости коллектора взаимодействуют с окружающей водой, а также между собой. В результате аэрированная жидкость, втекающая из приемных трубопроводов во внутрь горизонтально расположенного коллектора цилиндрической формы, отражается от противоположной вогнутой поверхности (рис. 10, сечение А-А), подобно двум и более первоначально круглым затопленным турбулентным струям.

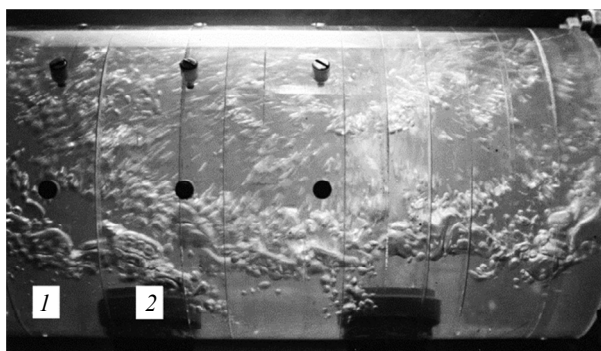
При этом прослеживается аналогия с известным случаем истечения жидкостей из отверстий или сопел в среду с теми же физическими свойствами, исследованным в [22]. Сходным фактором является то, что расход среды в начале такой струи по мере ее продвижения будет увеличиваться за счет процессов эжекционного вовлечения воды из затоп-

ленного пространства. Существенное отличие от классического описания поведения осесимметричной затопленной турбулентной струи [9], заключается в том, что струя из приемного трубопровода



**Рис. 15.** Процесс взаимодействия аэрированного потока из ближнего к насосной камере приемного трубопровода со скоростью более 1 м/с на входе в коллектор с корпусом коллектора и общим потоком: 1 – насосная камера; 2 – коллектор; 3 – приемный трубопровод

**Fig. 15.** The process of interaction of aerated flow from the receiving pipeline nearest to the pump chamber at the entrance to the collector with the collector body and with the total flow at a speed of more than 1 m/s: 1 – pumping chamber; 2 – collector; 3 – receiving pipeline



**Рис. 16.** Процесс взаимодействия аэрированных потоков из нескольких приемных трубопроводов со скоростью более 1 м/с в каждом из них на входе в коллектор с корпусом коллектора, между собой и общим потоком: 1 – коллектор; 2 – приемный трубопровод

**Fig. 16.** The process of interaction of aerated flows from several receiving pipelines with a speed of more than 1 m/s in each at the entrance to the collector with the collector body, mutually and with the general flow: 1 – collector; 2 – receiving pipeline

поступает не в открытое пространство, заполненное водой, а в значительно стесненное место, которым является коллектор (рис. 4), т.е. в пространство горизонтально расположенной цилиндрической емкости,  $DN$  которой обычно в 2,5 раза и более превышает начальный диаметр струи.

Невзирая на то, что выходное отверстие приемного трубопровода спрофилировано надлежащим образом, распределение скоростей в выходном сечении не может быть признано равномерным, по крайней мере в вертикальной плоскости, поскольку в верхней части сечения струи поток втекающей жидкости более аэрирован, чем в нижней. Это становится очевидным с учетом воздействия гравитационных сил и подтверждается экспериментально (рис. 15)

Наряду с этим в коллекторе имеется еще один общий нарастающий поток, движущийся с переменной скоростью в зависимости от расхода воды, поступающей из определенного количества подключенных приемных трубопроводов, и устремленный в направлении насосной камеры перпендикулярно струям.

Струи из каждого приемного трубопровода в процессе продвижения и эжекционного взаимодействия с общим потоком в коллекторе расширяются и «виртуально» обретают форму несколько искривленного конфузора. Потоки втекающих струй, наталкиваясь на противоположную вогнутую цилиндрическую стенку (рис. 16), разделяются в вертикальной плоскости на два неравных (в силу разнородного состава) потока, которые обращаются вспять. Разделившиеся и обращенные в процессе взаимодействия потоков струи претерпевают поворот вдоль стенок коллектора в вертикальной плоскости более чем на  $180^\circ$ .

Условные линии втекающих в коллектор из приемных трубопроводов потоков показаны на рис. 10, сечение  $A-A$ . Во время взаимодействия струй с преградой и поперечным течением, из которого расширяющимися струями вовлекается дополнительная масса жидкости, происходит очередное измельчение крупных пузырей воздуха до диаметров 3–5 мм, а также их интенсивное перемешивание (рис. 16).

При скорости истечения струй из приемных трубопроводов порядка 1 м/с, вследствие многочисленных изменений направлений и деформаций потоков, а также взаимного перемешивания течений, происходит интенсивное насыщение воздухом общего потока воды. Помимо этого, повышение скорости воды в коллекторе свыше 1 м/с



периодически сопровождается отделением группы пузырьков от общей аэрированной массы и присоединения их к нижнему сплошному потоку. В результате общая масса воды такой неравномерной консистенции всасывается насосом и происходит довольно быстрое блокирование его работы (рис. 17, см. вклейку).

По мере дальнейшего увеличения скорости каждой струи до 2 м/с и более (с ростом числа  $Re$ ) толщина струи и ее растр на подступе к цилиндрической стенке уменьшаются (эффект известный по [22]), но скорость обращенных потоков и интенсивность перемешивания воздуха с водой, наоборот, существенно возрастают. В результате этих воздействий в области ввода приемных трубопроводов в коллектор, многократного перемешивания всех избыточно аэрированных потоков внутри коллектора дополнительно образуется циркуляционное течение, которое насыщено спиральными вихревыми шнурами (рис. 10б), одновременно доставляющими водо-воздушные массы в насос (рис. 18, см. вклейку), что незамедлительно приводит к срыву его работы.

При одновременном задействовании всех приемных трубопроводов расход жидкости в струе из приемного трубопровода, расположенного наиболее близко к насосной камере, в единицу времени, как правило, будет пропорционально меньше суммарного объема жидкости, перемещающегося в коллекторе к насосной камере, благодаря слиянию жидкости, поступившей из соседних приемных трубопроводов. Аэрированная составляющая жидкости из ближнего к насосу приемного трубопровода беспрепятственно вносится общим потоком в насосную камеру в средней ее части (рис. 19, см. вклейку), а затем вовлекается в насос, не успевая всплывать.

Приемный трубопровод, расположенный соосно с коллектором, но с противоположной стороны по отношению к насосной камере (рис. 2), моделирует сопрягающийся с насосной камерой участок межпонтонной магистрали балластной системы. Поступление воздуха по данному трубопроводу происходит при необходимости задействования на практике трубопроводов балластных отсеков смежного понтона.

Испытания показали, что при скоростях потока свыше 0,5 м/с в кольцевом зазоре между корпусом насоса и насосной камеры в этом свободном трехмерном пространстве на уровне верхней кромки стыка участка стабильно образуется характерная объемная пульсирующая область, насыщенная массой пузырьков. Внутри этой области пузырьки хаотически перемещаются.

По мере поступления очередной порции аэрированной воды цепи пузырьков отделяются от общей пульсирующей массы и пролипают в насос.

Повышение скорости потока до 1 м/с и более ведет также к образованию колеблющегося пузырькового вихря, основание которого примыкает к растрube насоса. Этот вихрь гарантированно доставляет циркулирующую пузырьковую массу в насос (рис. 10б).

При скорости потока в выпускных участках приемных трубопроводов в пределах 2 м/с поступившая в них через приемные патрубки воздушная масса в процессе движения по трубопроводам измельчается до диаметра пузырьков  $d = 4$  мм и менее и значительно перемешивается с общим потоком жидкости. Совокупная избыточная пузырьковая масса поступает в коллектор балластной системы, хаотически перемещается во внутренней полости, беспрепятственно отражается от стенок и огибает обычные преграды и устройства. При этом еще более измельчается и затем вовлекается во всасывающую полость насоса, вызывая кавитационные эффекты и блокируя его работу.

Были проведены испытания и ряда других промежуточных вариантов воздействий на структуру потоков. Эксперименты показали, например, что вихри, индуцированные преградами, помещенными поперек потока на определенном расстоянии за впускным патрубком приемного трубопровода или внутри коллектора, создают вихревые жгуты, подвижные и видоизменяющиеся, которые тоже вовлекаются в часть общей водо-пузырьковой массы.

Как показали многочисленные опыты, объем воздуха, содержащийся в вихревом потоке, никуда не исчезает, а с легкостью вновь вовлекается в общий поток в коллекторе или насосной камере, дополнительно безвозвратно его аэрируя. Суть последующих проблем заключается в том, что процессы необходимого улавливания и отведения газовой составляющей потока в общую верхнюю газовую вакуумируемую полость насосной камеры не поддаются управлению и каким-либо воздействиям.

Исследования подтвердили также, что в судовых эжекторных установках, обеспечивающих вакуумирование сепарационной емкости и зачистку жидких сред в судовых цистернах, подача эжектора, типа широко применяемых в судовых системах [17] и запитываемых от судовых средств рабочими жидкостями с одинаковыми свойствами, находится в пределах 10 % от подачи основного насоса.

Таким образом, для воздействия на аэрированные потоки внутри рассматриваемых водоводов с различной конфигурацией внутренних полостей при скоростях более 0,6 м/с необходимы специальные устройства. Кроме того, при испытаниях было выявлено, что недостаточно надежна и одноступенчатая сепарация потоков внутри коллектора.

С учетом результатов экспериментов разработаны и апробированы новые методы обработки аэрированного потока и выделения из него воздушной фазы. Ряд таких методов в процессе многочисленных экспериментов по эффективной доставке пузырьков ближе к поверхности раздела сред при скоростях потоков более 0,6 м/с (например, с помощью специальных устройств) позволяет осуществлять управление процессами распределения смешанных потоков среды в начале их пути внутри коллектора.

Однако испытания показали, что подобные методы сильно отличаются от традиционно применяемых и общепризнанных эффективными средств. При этом общие или даже универсальные «рецепты» как при стабильных конструктивных параметрах емкостей, так и при различных соотношениях размеров внутренних полостей или насыщениях водоводов описанными выше либо иными типовыми или оригинальными конструктивами при стационарных режимах потоков не проявлялись.

## Заключение

### Conclusion

Качественные картины и кинематические схемы течений, полученные на основе исследований на макетах, являются в известной степени приближенными. Однако даже представленная часть результатов гидравлических исследований отвечает на многие вопросы о том, как взаимодействуют потоки и почему не происходит разделение двухфазных течений, реализующихся внутри исследованных конструкций.

Материалы проведенных опытов позволяют получить более углубленное понимание процессов, происходящих в ответственных участках балластных систем плавучих доков, и могут быть полезными для совершенствования проточных конструкций коллекторов и насосных камер, выполненных ранее на основе сложившихся представлений или прототипов при проектировании перспективных плавдоков.

В процессе испытаний установлено, что обеспечить сепарацию воздуха простым способом при скоростях потоков в приемных трубопроводах

свыше 0,5 м/с без специального конструктивного воздействия невозможно.

С учетом положительных результатов испытаний участков балластных доковых систем традиционных типов, ответственных, кроме основного предназначения, и за сепарацию воздуха из балласта, может быть разработан ряд вполне осуществимых, но более эффективных конструкций для сепарации воздуха в коллекторе и водоподводящей насосной камере.

По результатам выполненных экспериментальных работ могут быть разработаны новые технические решения и конструкции для разделения гетерогенной среды в соответствии с обозначенными выше задачами. В целях исследования эффективности и отработки новых конструкций макет может быть доработан, а собственно внутренние конструкции как в коллекторе, так и в насосной камере могут быть существенно модифицированы. Программа испытаний макета имеет потенциал для значительного расширения. Так, в нее можно включить испытания широкого спектра новых внутренних устройств для интенсификации процессов сепарации воздуха, разработанных вместо известных, широко освещенных в технической литературе конструкций, однако, по результатам настоящих испытаний, проведенных на разных режимах, не подтвердивших ожидаемую эффективность.

Некоторые разработанные и предварительно апробированные в Крыловском центре и ЦМКБ «Алмаз» технические решения содержат потенциальную возможность для существенного изменения системы рассмотренных выше потоков (рис. 10б), реализующихся в коллекторе и насосной камере, в реально сжатых размерах рассматриваемых конструкций, допустимых по технологическим соображениям.

На основании результатов всего комплекса испытаний, выполненных и отчасти представленных в настоящей работе, могут быть также выработаны предложения по совершенствованию участка балластных систем плавучих доков, размещаемого непосредственно в насосном отделении и ответственного за эффективное удаление балласта главным насосом, с целью дополнения действующих правил проектирования балластных систем.

## Список использованной литературы

1. *Фомин А.П.* Стандартизованная терминология в судостроении : справочник. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2020. 335 с.

2. Металлические плавучие доки / М.А. Ловягин, В.М. Корсаков, Я.Б. Каганер [и др.] ; под общ. ред. М.А. Ловягина. Ленинград : Судостроение, 1964. 336 с.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. VIII. Системы и трубопроводы : НД № 2-020101-138 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2021. 234 с.
4. РД5.5396-79. Система балластная доковая. Правила и нормы проектирования. 1979. 36 с.
5. Балластная система плавучего дока : А.с. 921956 СССР / Иванов Ю.А., Елисеев В.Н., Безручко А.П., Чирков А.Б. № 4059768; заявл. 16.04.1986; опубл. 07.09.1988, Бюл. № 33. 2 с.
6. Системы основных групп, обеспечивающие корректную работу плавучих доков // Sea-Man.org : [сайт]. 2020. 15 мая. URL: <https://sea-man.org/sistemy-metallicheskih-plavuchikh-dokov.html> (дата обращения: 06.05.2022).
7. Агрегат электронасосный ОВ6-38х2 МБК // Уральский завод гидравлических машин : [сайт]. Екатеринбург, 2022. URL: <https://uzgm.su/produksiya/nasosyi-osevyie/11/> (дата обращения: 20.01.2022).
8. Улучшение эксплуатационных характеристик плавдока «Амгунь». Ленинград : Западное ПКБ, 1989. 46 с.
9. Лойцанский Л.Г. Механика жидкости и газа. 5-е изд., перераб. Москва : Наука, 1978. 736 с.
10. Кутателадзе С.С., Стрыкович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергия, 1976. 296 с.
11. Штода А.И. Исследования процессов выделения газов из жидких сред в судовых сепарационных установках и аппаратах // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2022. Вып. 2(400). С. 133–146. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-133-146.
12. Брусельницкий Ю.М. Судовые устройства очистки трюмно-балластных вод от нефтепродуктов. Ленинград : Судостроение, 1966. 201 с.
13. Тихомиров Г.И. Технология обработки воды на морских судах. Курс лекций // Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2013. 159 с.
14. Родионов Н.Н. Современные танкеры. Ленинград : Судостроение, 1980. 277, [6] с.
15. Наумов Б.А. Судовые трубопроводы. [Ленинград] : Судпромгиз, 1950. 316 с.
16. Балластная система для судов : А.с. 694414 СССР / Бензорок В.А., Вяльцев Б.А., Руденко В.В. № 2580181; заявл. 10.02.1978; опубл. 30.10.1979, Бюл. № 40. 3 с.
17. ОСТ 5Р.5033–93. Эжекторы водоструйные. Технические условия. 1993. III, 32 с.
18. Штода А.И. Совершенствование принципов проектирования судовых трюмных и балластных систем : дис. ... канд. техн. наук / Ленингр. кораблестроит. ин-т. Ленинград, 1990. 200 с.
19. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. 8-е изд., перераб. Москва : Наука, 1977. 438 с.
20. Долинский Е.Ф. Обработка результатов измерений. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Изд-во стандартов, 1973. 191 с. (Библиотека метролога).
21. PA stripping system for central pump rooms // Eureka products. Thune-Eureka : catalog. S.I., 2013. S. pag.
22. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. Москва : Машиностроение, 1978. 463 с.

## References

1. Fomin A.P. Standardized terminology in shipbuilding : handbook. St. Petersburg : Krylov State Research Center, 2020. 335 p. (in Russian).
2. Metal floating docks / M.A. Lovyagin, V.M. Korsakov, Ya.B. Kaganer [et al.] ; under the general editorship of M.A. Lovyagin. Leningrad : Sudostroenie, 1964. 336 p. (in Russian).
3. Rules of classification and construction of sea vessels. Part VIII. Systems and pipelines : ND No. 2-020101-138 / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2021. 234 p. (in Russian).
4. RD5.5396-79 / The ballast dock system. Rules and standards of design. Leningrad, 1979. 36 p. (in Russian).
5. Ballast system of a floating dock : A.S. 921956 USSR / Yu.A. Ivanov, V.N. Eliseev, A.P. Bezruchko, A.B. Chirkov. No. 4059768; application No. 16.04.1986; publ. 07.09.1988, Bul. No. 33. 2 p. (in Russian).
6. Systems of the main groups that ensure correct operation of floating docks // Sea-Man.org : [site]. 2020. May 15. URL: <https://sea-man.org/sistemy-metallicheskih-plavuchikh-dokov.html> (Accessed: 06.05.2022) (in Russian).
7. Electric pump unit OV6-38x2MBK // Ural plant of hydraulic machines : [site]. Yekaterinburg, 2022. URL: <https://uzgm.su/produksiya/nasosyi-osevyie/11> (Access: 20.01.2022) (in Russian).
8. Improvement of floating dock Amgun operational characteristics. Leningrad : Zapadnoye PKB, 1989. 46 p. (in Russian).
9. Loitsyansky L.G. Mechanics of liquid and gas. 5<sup>th</sup> ed., reprint. Moscow : Nauka, 1978. 736 p. (in Russian).
10. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. Hydrodynamics of gas-liquid systems. 2<sup>nd</sup> ed., reprint. and add. Moscow : Energiya, 1976. 296 p. (in Russian).
11. Shtoda A.I. Studies of processes of gas separation from liquid media in ship separation plants and apparatuses // Transactions of Krylov State Research Center. 2022. Vol. 2(400). P. 133-146. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-133-146 (in Russian).

12. *Bruselitsky Yu.M.* Shipboard bilge-ballast water purification equipment from petroleum products. Leningrad : Sudostroenie, 1966. 201 p. (*in Russian*).
13. *Tikhomirov G.I.* Technology of water treatment on marine vessels. Course of lectures // Vladivostok : Moscow State University, 2013. 159 p. (*in Russian*).
14. *Rodionov N.N.* Modern tankers. Leningrad : Sudostroenie, 1980. 277, [6] p. (*in Russian*).
15. *Naumov B.A.* Ship pipelines. [Leningrad] : Sudpromgiz, 1950. 316 p. (*in Russian*).
16. Ballast system for ships : A.S. 694414 USSR / *V.A. Ben-zoruk, B.A. Vyaltsev, V.V. Rudenko*. No. 2580181; application 10.02.1978; publ. 30.10.1979, Bul. No. 40. 3 p. (*in Russian*).
17. OST 5P.5033-93. Water jet ejectors. Technical specifications. 1993. III, 32 p. (*in Russian*).
18. *Shtoda A.I.* Improving the principles of designing ship bilge and ballast systems: dissertation. Candidate of Technical Sciences / Leningrad Shipbuilding Institute, Leningrad, 1990. 200 p. (*in Russian*).
19. *Sedov L.I.* Similarity and dimension methods in mechanics. 8<sup>th</sup> ed., revised. Moscow : Nauka, 1977. 438 p. (*in Russian*).
20. *Dolinsky E.F.* Processing of measurement results. 2<sup>nd</sup> ed., revised and updated. Moscow : Publishing House of Standards, 1973. 191 p. (Metrologist's Library) (*in Russian*).
21. PA stripping system for central pump rooms // Eureka products. Thune-Eureka : catalog. S.I., 2013. S. pag.
22. *Yemtsev B.T.* Technical hydromechanics. Moscow : Mashinostroenie, 1978. 463 p. (*in Russian*).

---

#### Сведения об авторе

*Штода Александр Иванович*, к.т.н., ведущий научный сотрудник НИИ «ЛОТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 199178, Россия, Санкт-Петербург, 19 линия В.О., д. 24. Тел.: +7 (812) 748-54-52. E-mail: lot@ksrc.ru.

#### About the author

*Alexander I. Shtoda*, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher, LOT Branch of Krylov State Research Centre. Address: 24, 19<sup>th</sup> Line of Vasilyevsky Ostrov, St. Petersburg, Russia, post code 199178. Tel.: +7 (812) 748-54-52. E-mail: lot@ksrc.ru.

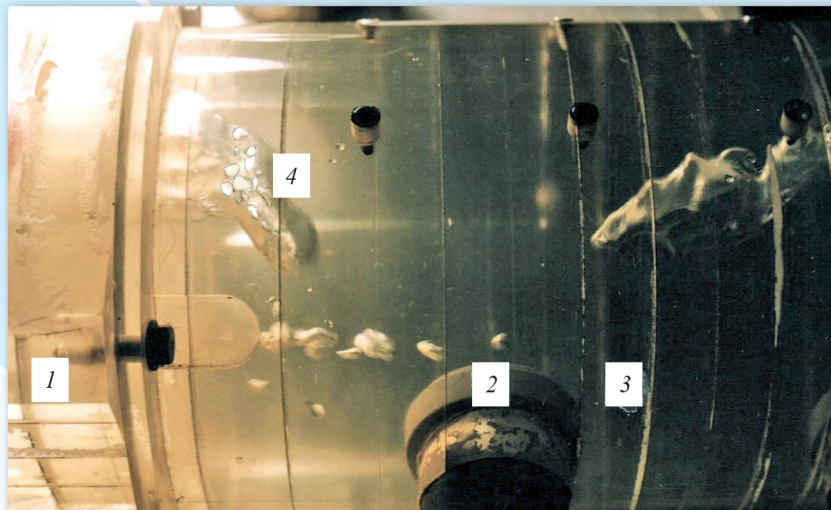
Поступила / Received: 18.03.22  
Принята в печать / Accepted: 30.06.22  
© Штода А.И., 2022

**Рис. 11.** Фрагмент свободного выделения пузырьков в коллекторном участке балластной системы при поступлении аэрированных потоков из приемных трубопроводов со скоростью в пределах 0,5 м/с:

1 – насосная камера; 2 – патрубок приемного трубопровода; 3 – коллектор; 4 – пузырьковая структура

**Fig. 11.** Fragment of free release of bubbles in the collector section of the ballast system when aerated flows flow from the receiving pipelines at a speed within 0.5 m/s:

1 – pumping chamber; 2 – receiving pipeline nipper; 3 – collector; 4 – bubble structure

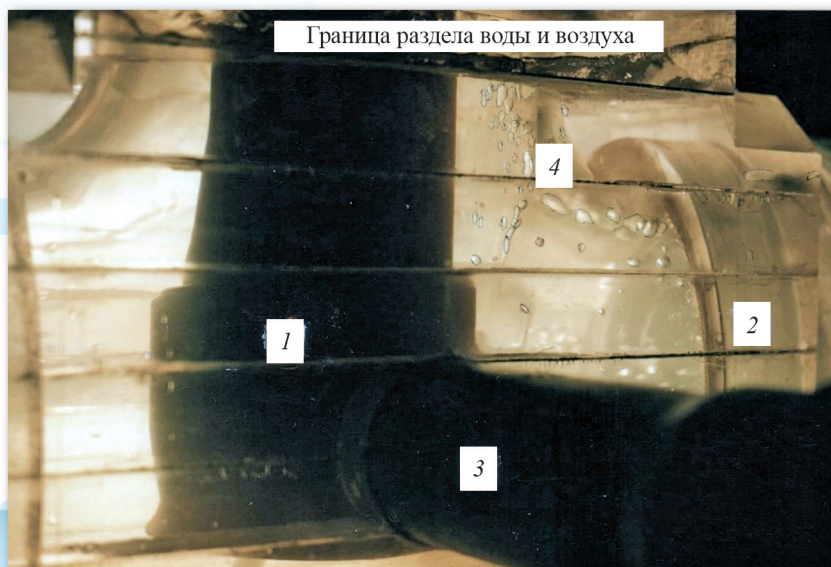


**Рис. 12.** Фрагмент свободного выделения пузырьков на входе в насосную камеру из коллектора при поступлении аэрированных потоков из приемных трубопроводов со скоростью в пределах 0,5 м/с:

1 – корпус насоса; 2 – коллектор; 3 – впускной патрубок приемного трубопровода в насосной камере; 4 – пузырьковые цепочки

**Fig. 12.** Fragment of free release of bubbles at the entrance to the pumping chamber from the collector at ingress of aerated flows from the receiving pipelines at a speed within 0.5 m/s:

1 – pump body; 2 – collector; 3 – inlet pipe of the receiving pipeline in the pumping chamber; 4 – bubble chains

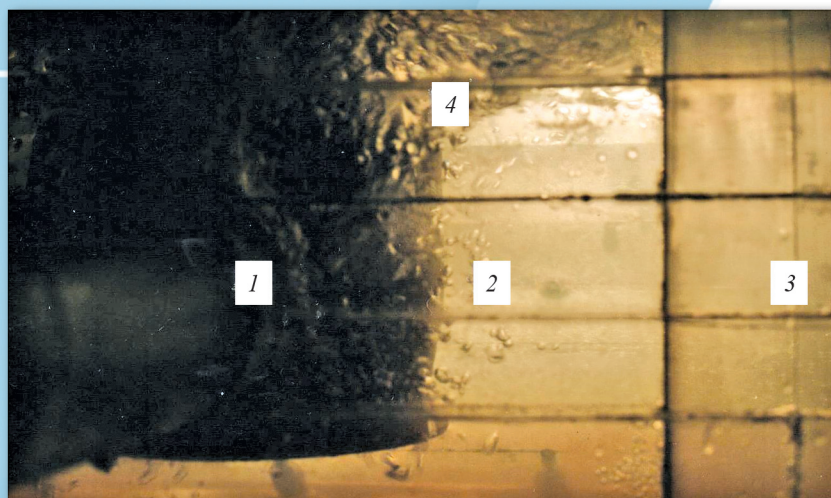


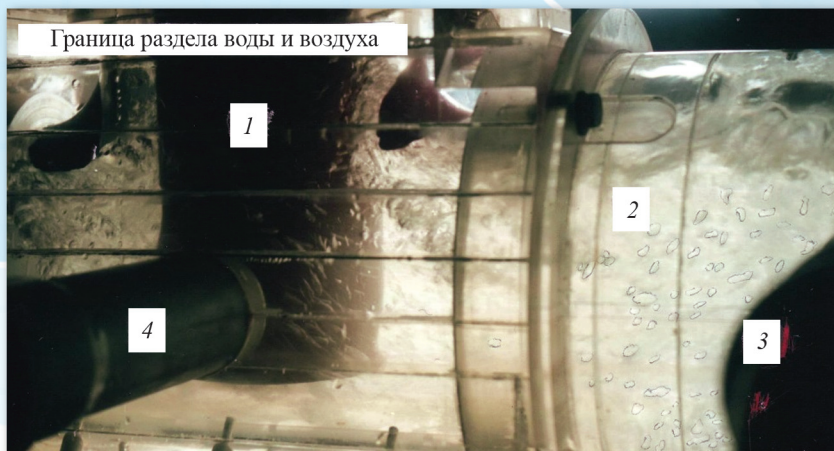
**Рис. 14.** Фрагмент процесса критического образования и вовлечения множественных пузырьковых вихрей на входе в насос из насосной камеры и коллектора при поступлении аэрированных потоков со скоростью более 1 м/с:

1 – корпус насоса; 2 – насосная камера; 3 – участок коллектора; 4 – пузырьковый вихрь

**Fig. 14.** Fragment of critical formation and involvement of multiple bubble vortices at the pump inlet from the pumping chamber and collector when aerated flows ingress at a speed of more than 1 m/s:

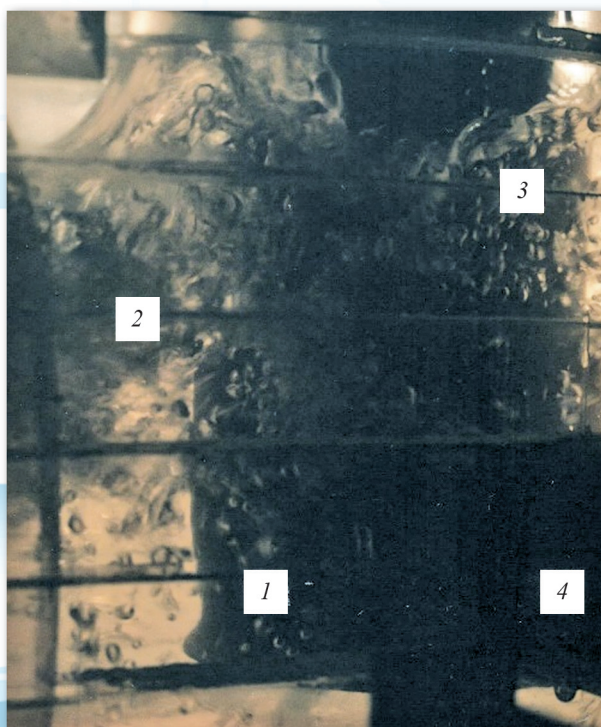
1 – pump body; 2 – pump chamber; 3 – collector section; 4 – bubble vortex





**Fig. 17.** Intensive critical air saturation of the total circulating water flow in the collector and pump chamber from all sources of aerated flows with velocities over 1 m/s, involved in the bell and blocking the pump operation:  
 1 – axial pump body;  
 2 – collector;  
 3 – collector receiving pipeline;  
 4 – receiving pipeline pump chamber

**Рис. 17.** Интенсивное критическое насыщение воздухом суммарного циркуляционного течения воды в коллекторе и насосной камере от всех источников аэрированных потоков со скоростями в них свыше 1 м/с, вовлекаемого в раструб и блокирующего работу насоса: 1 – корпус осевого насоса; 2 – коллектор; 3 – приемный трубопровод коллектора; 4 – приемный трубопровод насосной камеры



**Рис. 18.** Хаотическая активная обширная вихревая пузырьковая пульсирующая масса, пополняемая аэрированными потоками от приемных трубопроводов и со стороны межпонтонной магистрали со скоростью свыше 1 м/с, вовлекаемая в раструб и блокирующая работу насоса: 1 – корпус осевого насоса; 2 – насосная камера; 3 – пузырьковая пульсирующая вихревая масса; 4 – приемный трубопровод насосной камеры

**Fig. 18.** Chaotic active extensive vortex bubble pulsating mass replenished by aerated flows from the receiving pipelines and the inter-pontoon main side aerated flows at a speed of over 1 m/s, involved in the bell and blocking the operation of the pump: 1 – axial pump housing; 2 – pumping chamber; 3 – bubble pulsating vortex mass; 4 – receiving pipeline of the pumping chamber



**Рис. 19.** Активная пузырьковая область, пополняемая аэрированным потоком со стороны межпонтонной магистрали со скоростью порядка 1 м/с и вовлекаемая в насос: 1 – корпус насоса; 2 – насосная камера; 3 – фланец сопряжения с межпонтонной магистралью; 4 – пузырьковая пульсирующая область и вихрь

**Fig. 19.** Active bubble region replenished by aerated flow from the inter-pontoon main side at a speed of about 1 m/s and involved in the pump: 1 – pump housing; 2 – pump chamber; 3 – interface flange with the inter-pontoon main; 4 – bubble pulsating region and vortex