

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-133-146
УДК 66.066+621.928.4+629.5.06

А.И. Штода

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

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЫДЕЛЕНИЯ ГАЗОВ ИЗ ЖИДКИХ СРЕД В СУДОВЫХ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ И АППАРАТАХ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются сепарационные установки и аппараты для разделения гомогенных (многофазных) жидких сред на моногенные (однофазные), применяемые в судостроении и других отраслях промышленности. Цель работы – определение эффективности различных версий оборудования и технических решений путем моделирования процессов сепарации аэрированных пространственных потоков с помощью модифицируемых макетов на экспериментальной установке.

Материалы и методы. Официальные информационные материалы в области науки и техники на тему аналитических и экспериментальных исследований процессов в сепарационных установках и аппаратах. Методология механики жидкости и газа, методы теории размерности, экспериментальные методы.

Основные результаты. Рассмотрены современные достижения в области создания и эксплуатации сепарационных установок и аппаратов в судостроении и в смежных отраслях. Отражена классификация основных применяемых физических принципов воздействия на процессы разделения смесей жидких сред. На гидравлическом стенде на унифицированных версиях модифицируемого макета проведены испытания ряда типовых технических решений, применяемых в судовых и промышленных сепарационных установках и аппаратах, предназначенных для управления процессами разделения пространственных многофазных потоков на однофазные.

Экспериментальная оценка выявила несовершенства конструкций, характеризующих слабый уровень развития рассматриваемых объектов. Выявлены закономерности поведения высоконасыщенных многофазных потоков, которые обладают физическими параметрами, установленными согласно практике эксплуатации оборудования в составе систем, в различных условиях с учетом разных конфигураций замкнутых контуров. Дополнена информация о взаимодействии многофазных потоков с конструктивами внутри ряда типов сепарационных устройств. Определены причины, препятствующие оптимизации процессов сепарации, обозначены перспективные конструктивные направления совершенствования сепарационных установок и аппаратов.

Заключение. Результаты работ позволяют принимать объективное решение о применении конкретного типа сепараторов в определенных условиях эксплуатации в составе различных судовых или промышленных систем. Предложенные технические решения актуальны для разработки более совершенного импортозамещающего конкурентоспособного сепарационного оборудования. Экспериментальные материалы пригодны также для развития требований проектирования судовых балластных систем с высокопроизводительными насосами.

Ключевые слова: сепарационные установки и аппараты, гетерогенные жидкости, пространственные течения, судовые грузовые и балластные системы, гидравлический стенд, испытательные макеты, устройства и характеристики процессов сепарации, технические предложения.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-133-146
UDC 66.066+621.928.4+629.5.06

A. Shtoda

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

GAS EMISSION FROM FLUIDS IN MARINE DE-AERATION PLANTS AND UNITS

Для цитирования: Штода А.И. Исследования процессов выделения газов из жидких сред в судовых сепарационных установках и аппаратах. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 2(400): 133–146.

For citations: Shtoda A. Gas emission from fluids in marine de-aeration plants and units. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 2(400): 133–146 (in Russian).

Object and purpose of research. This paper discusses plants and units for splitting homogeneous (multi-phase) fluids into homogenous phases for shipbuilding and other industrial applications. The purpose of this work is to determine efficiency of hardware and solutions of various versions through simulation of separation processes for aerated 3D flows by means of configurable dummies at the experimental rig.

Materials and methods. Official scientific and technical publications about analytical and experimental studies on the processes taking place in separation plants and units. Methodology of fluid and gas mechanics, dimension theory methods, experimental methods.

Main results. This paper discusses the state of the art in development and operation of de-aeration plants and units in shipbuilding and related industries, with classification of main physical principles of fluid degassing. Experimental studies were performed at hydraulic test rig with unified versions of reconfigurable dummy for a variety of typical solutions currently applied at marine and industrial separation plants and units for controllable splitting of multi-phase flows into separate phases.

Experimental assessment has found structural imperfections demonstrating the low technical level of investigated objects. It also highlighted behavioral patterns of highly saturated multi-phase flows with physical parameters established as per the practice of operating the equipment as part of systems, i.e. in different conditions and different configurations of closed-loop circuits. The study yielded new knowledge about the interaction of multi-phase flows with structural parts of a number of separation units. Finally, the study highlighted current obstacles for the optimization of separation processes, as well as suggested promising ways to high-end designs of separation plants and units.

Conclusion. The findings of this work enable an objective decision-making about the application of given separation unit type in given service conditions as part of various marine or industrial systems. Technical solutions suggested in it will be helpful insights for development of more advanced and competitive separation units that would replace the imported products. The test data obtained in this work could also be helpful for further development of design requirements to marine ballast systems with high-capacity pumps.

Keywords: separation units and plants, multi-phase fluids, 3D flows, ship cargo and ballast systems, hydraulic test rig, experimental dummies, separation hardware and parameters, technical proposals.

The author declares no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Сепарация различных перемещаемых гетерогенных жидких сред, состоящих из хаотических или упорядоченных в движениях структур, находящихся в различном агрегатном состоянии, необходимая по условиям эксплуатации различных промышленных функциональных комплексов, систем и оборудования, изначально являлась серьезной технической проблемой. Эта сложность проистекает, прежде всего, из сложности и своеобразия законов взаимодействия межмолекулярных сил в течениях жидкостей и газов [1].

По мере развития науки и техники данная проблема в разных отраслях промышленности и в жилищных трубопроводных коммуникациях применительно к конкретным необходимым или универсальным условиям эксплуатации постепенно разрешалась с помощью разнообразных по конструкции, сложности и оригинальности аппаратов и устройств, порой весьма своеобразных. В основе конструкций большинства существующих аппаратов и установок используются несколько известных, зачастую взаимосвязанных, физических явлений, а именно: естественная гравитационная флотация барботированных составов, механическое разделение сред с различным удельным весом путем воз-

действия центробежных сил внутри аппаратов, изменение давления (искусственное применение перепадов давления) в емкостях в целом или на отдельных участках последних.

В отношении воздействия физических полей (электрического, магнитного, иного) на энергию взаимодействующих частиц [1] следует учитывать, что их применение зависит от допустимых по безопасности условий. Необходимо упомянуть также непосредственную механическую фильтрацию на ионном уровне (обратный осмос и ультрафильтрация). Естественно, применяются и комбинированные воздействия на молекулярную структуру смешанных сред с целью более эффективного разделения их на самостоятельные фазы и объемы. Подробная классификация ряда методов разделения устойчивых гетерогенных составов и описание современного промышленного и судового оборудования для сепарации жидких многокомпонентных сред и применяемых принципов сепарации содержится, например, в известном труде [2].

В судостроительной практике различные сепарационные установки и аппараты разной сложности и степени автоматизации применяются в грузовых системах наливных судов и балластных системах грузовых судов и плавбуровых установок. Это делается для повышения надежности запуска и эффективности высокопроизводительных насосов, особен-

но на заключительных стадиях откачивания жидких грузов из судовых танков, а также при дебалластировке балластных отсеков или цистерн.

Проблемами совершенствования этих процессов в разные годы серьезно занимались в зарубежном и отечественном судостроении. На основе исследований и научных достижений применялись различные подходы, оборудование и средства. Исследования в этой области показывают, что судовые установки и аппараты, как правило, снабжают вертикально развитыми сепарационными емкостями, ввиду стесненности условий в машинно-котельных отделениях или в помещениях вспомогательных механизмов для горизонтального размещения установок, с учетом зон обслуживания в процессе их повседневной или периодической эксплуатации на судах.

Для иллюстрации существующих сепарационных установок и аппаратов и использованных в них физических принципов разделения разных гетерогенных жидких составов, а также примененных оригинальных технических решений целесообразно первоначально рассмотреть ряд серийных и широкоходовых изделий и устройств в различных отраслях промышленности.

Нефтегазовые сепараторы

Oil and gas separators

Сепарация (отделение) газа от жидкости признана важнейшей операцией в процессах нефтегазопереработки и залогом высокого качества продукции. Этот процесс является первым этапом подготовки газа к транспортировке и переработке. Сепараторы широко применяются во многих технологических процессах нефтегазовой отрасли, а именно:

- на промыслах для разделения продукции скважин на газ, нефть, пластовую воду;
- в установках подготовки газа на месторождениях и перерабатывающих заводах;
- на нефтеперерабатывающих предприятиях в составе установок пиролиза, каталитического риформинга, изомеризации, гидроочистки, каталитического крекинга и др.;
- в составе факельных установок, а также в блоках подготовки газа на компрессорных станциях (сепараторы-пробкоулавливатели и др.).

Одним из признанных лидеров российского рынка по производству сепараторов для дегазации нефти и подготовки для дальнейшего использования газа различных типов, исполнений и комплектаций является ООО «Завод «Нефтегазобору-

дование». Согласно анонсируемым спецификациям это предприятие по отработанным технологиям изготавливает сепараторы как по техническим условиям на поставку [3], так и по индивидуальным проектам. Производственная программа предусматривает выпуск сепараторов для обработки нефтегазовых фаз и трехфазных углеводородных смесей в диапазонах рабочих давлений до 0,6 МПа, до 2,5 МПа и выше.

Цилиндрические сепараторы, производимые предприятием, по форме и положению в пространстве подразделяются на горизонтальные и вертикальные.

Преимуществом *горизонтальных аппаратов* в условиях промышленной эксплуатации является простота транспортировки и монтажа на объекте, меньший, чем у вертикального сепаратора, диаметр при одинаковой производительности и, что существенно, меньшая стоимость аппарата при сопоставимых показателях назначения. К недостаткам относятся: затрудненный контроль уровня жидкости, трудоемкие процессы очистки аппарата от песка, грязи и парафинов, и большая, по сравнению с вертикальными аппаратами, свободная поверхность жидкости.

К очевидным плюсам *сепараторов вертикального исполнения* отнесены: полное улавливание из газа больших количеств механических примесей, небольшая испаряемость жидкости; простота очистки аппарата от грязи; легкость контроля уровня жидкости в аппарате. (Впрочем, последний фактор с помощью автоматизированных средств контроля уровней жидкости в емкостях может быть снивелированным по отношению к горизонтальным аппаратам. – *Прим. авт.*)

Очистные способности рассмотренных исполнений сепараторов, согласно классификации разработчиков и производителей оборудования, основаны на применении одного или нескольких принципов осаждения.

В т.н. *гравитационных* аппаратах разделение фаз происходит за счет сил тяготения. Сепараторы, основанные на таком принципе, обычно имеют несложную конструкцию, но по относительным массогабаритным характеристикам уступают другим типам.

В *центробежных* сепараторах разделение сред происходит в общем тоже благодаря силам тяготения, но дополнительно в поле приложенных центробежных сил. Такие аппараты отличаются сложностью конструкции, т.к. снабжаются центробежно-вихревыми насадками, циклонами, роторными и подобными устройствами.

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

Популярные [4] конструктивные схемы, применяемые во внутренних полостях промышленных сепараторов, а также некоторых судовых аппаратах, приведены на рис. 1 (см. вклейку).

В процессе работы промышленных и судовых систем сжатого воздуха возникает обратная проблема – необходимость удаления капель масла и влаги с целью предотвращения выхода потребителей сжатого воздуха из строя или поломки. Эту функцию выполняют *магистральные сепараторы-маслолагоотделители*, которые обеспечивают очистку воздуха от остаточных долей масла и конденсата, образовавшихся в воздухе в процессе его сжатия.

Принципиальная схема работы циклонного сепаратора типа ARIACOM [5] приведена на рис. 2 (см. вклейку).

Согласно описанию [5] поток воздуха на входе в сепаратор попадает в завихритель (1), где закручивается (2) с большой скоростью. Частицы жидкости, находящиеся в воздухе, под воздействием центробежной силы начинают скапливаться внутри на стенках сепаратора, после чего стекают в его нижнюю часть (3), отделенную перегородкой (4). Такая перегородка необходима для предотвращения возврата конденсата. Далее очищенный поток воздуха

направляется на выход из сепаратора через выходную трубу (5). Отсепарированная жидкость, накопившаяся в донной части сепаратора, подконтрольно отводится наружу (6). Уровень скопившейся жидкости не должен быть выше уровня перегородки (4).

(Производитель отмечает относительную простоту эксплуатации и надежность аппарата ввиду отсутствия сменных элементов и электроприводов, за исключением случаев, когда требуется автоматизированная система отвода водомасляной эмульсии. – *Прим. авт.*)

Приведенные типы и разновидности сепараторов – лишь малая толика из широкой гаммы применяемых промышленных аппаратов и устройств.

Сепарационные установки специальных систем наливных судов и судовых балластных систем

Separation plants for special systems of tankers and ship ballast systems

Представительная линейка применяемых аппаратов и разнообразие конструкций сепарационных установок присущи и судовым системам. Судовые сепарационные устройства относятся к оборудованию, подпадающему под наблюдение классификационных обществ. Как правило, это отражено в спецификациях на конкретные типы судовых сепарационных установок.

Следует отметить, что в данной статье не рассматривается отдельный широкий класс сепарато-

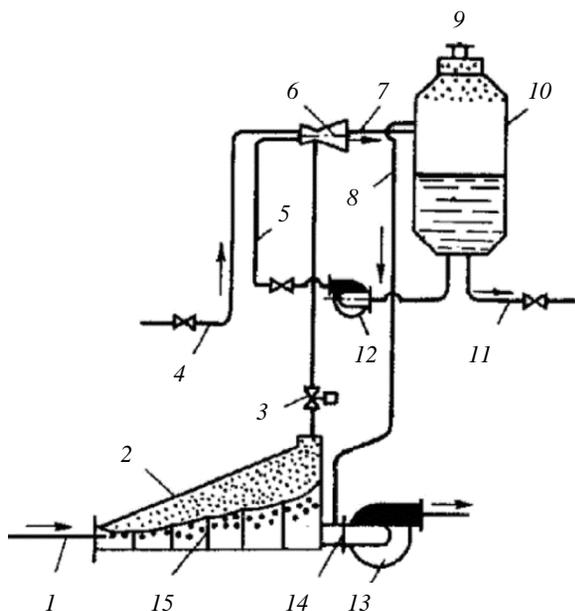


Рис. 3. Схема установки фирмы «Каррутерс» для удаления газов и воздуха из всасывающего трубопровода:

1 – всасывающий трубопровод; 2 – сепаратор; 3 – поплавковый клапан; 4, 5, 7, 11 – трубопроводы забортной воды; 6 – эжектор; 8 – трубопровод отсепарированного нефтепродукта; 9 – воздушный патрубок; 10 – конденсатор; 12 – водокольцевой насос; 13 – грузовой насос; 14 – патрубок очищенного от газов нефтепродукта; 15 – перфорированные перегородки

Fig. 3. Layout of Carruthers plant for gas and air removal from suction pipeline: 1 – suction line; 2 – separator; 3 – float-valve; 4, 5, 7, 11 – seawater pipelines; 6 – ejector; 8 – degassed oil pipe; 9 – air branch pipe; 10 – condenser; 12 – liquid-piston pump; 13 – cargo pump; 14 – degassed oil branch pipe; 15 – perforated barriers

ров топлива и масла, предназначенных для тонкой очистки судовых горючесмазочных материалов от инородных твердых частиц и нежелательных жидких компонентов иного химического состава с целью обеспечения чистоты и качества ГСМ для надежной работы главных и вспомогательных энергетических установок.

В качестве примеров рассмотрены лишь некоторые специальные или универсальные относительно сложные судовые сепарационные установки и устройства, вошедшие в свои конструкции компиляции наиболее эффективных (по мнению производителей. – *Прим. авт.*) преобразователей многофазных пространственных потоков в монофазные и примененные в них технические решения.

На протяжении многих лет в ряде публикаций в качестве положительного примера приводится сепарационная установка фирмы «Каррутерс» [6], схема которой представлена на рис. 3. Установка предназначена для разделения нефтегазовой смеси, образующейся в процессах зачистки танков нефтеналивного судна. Сепаратор (2) содержит несколько перфорированных перегородок (15), обеспечивающих разделение сред. Отделенная нефть (или нефтепродукт) поступает к грузовому насосу (13), а выделившийся газ, по мере концентрации и повышения давления, удаляется через невозвратный клапан (3) на обработку, в свою очередь, в конденсатор (10), при наличии в газе водяных паров.

На танкерах и супертанкерах с линейными и кольцевыми грузовыми системами с высокопроизводительными грузовыми насосами широкое распространение получили сепарационные установки типа «Сентри-стрип» [7] и ряда других аналогичного назначения. Комплектность и дислокация судовой автоматизированной сепарационной установки норвежской фирмы Thune-Eureka A/S в составе специальных систем наливных судов, а также общий принцип действия установки этого типа приведены на рис. 4 (см. вклейку).

По уровню автоматизации работы в составе систем данный тип установок можно отнести к числу наиболее насыщенных вспомогательным оборудованием. Установка является универсальной, поскольку предназначена для обеспечения запуска и устойчивой (т.е. бескавитационной, бессрывной) работы высокопроизводительных судовых грузовых и балластных насосов. Несмотря на высокую сложность конструкции и дороговизну, этот тип сепарационных установок широко используется в составе судовых систем: грузовой с разветвленными приемными трубопроводами и общим насо-

сом, балластной, системы мойки танков, а также у первых двух типов систем (грузовой и балластной) в качестве зачистной.

Сепараторы применяются также в специальных системах судов-газовозов [8]. Кроме того, в составе системы аварийной выгрузки сжиженных газов (СГ), выполненной по т.н. газлифтной схеме [6], имеет место газожидкостный сепаратор – типа приведенного на рис. 4.

Грузовой компрессор в системе СГ создает разрежение в сепараторе, отчего в него поступает газожидкостная смесь. Из сепаратора жидкий газ перекачивается в береговую емкость, а газообразная фракция конденсируется в теплообменнике и вновь поступает в цистерну или непосредственно в береговую емкость. Уровень жидкости в сепараторе поддерживается автоматическим устройством, регулирующим производительность компрессора и насоса.

Известно также множество других типов и описаний конструкций сепарационных аппаратов и устройств, применяемых в различных отраслях промышленности, популярных иллюстраций и даже видеоматериалов, демонстрирующих модели процессов разделения фаз во внутренних полостях сепарационных установок, характеризующих их эффективность.

В фундаментальном труде [1] приведены обобщенные уравнения динамики взаимодействия компонент в сплошной неоднородной среде. Тем не менее теоретических или экспериментальных исследований структурных преобразований гетерогенных потоков в гомогенные в конкретно рассматриваемых условиях, т.е. в относительно замкнутых контурах систем или аппаратов типа судовых или общепромышленных, опубликовано сравнительно мало. Причина сложившегося положения в этом разделе науки и техники объясняется в [1] недостаточной изученностью механизма межфазного взаимодействия в гетерогенных средах.

Учитывая, что в системах с использованием сепарационных установок для разрежения среды внутри устройств часто используются эжекторы, некоторые представляющие интерес аналогии отмеченных процессов можно встретить в работе [9], посвященной созданию эффективных струйных аппаратов. В отношении этих аппаратов в данном научном труде обстоятельно рассмотрены математические модели течения двухфазной двухкомпонентной смеси и содержатся результаты экспериментальных исследований эффективности работы струйных аппаратов при перемещении двухфазных сред.

Следует отметить, что в процессе выполнения работ по совершенствованию судовых систем и комплектующего оборудования исследованием процессов поведения гетерогенных жидких сред с различными сочетаниями компонентов (аэрации, деаэрации, захваты взвесей потоками, переносы или выпадение из потоков твердых частиц либо продуктов коррозии) в необходимой для решения главных задач мере занимались известные ученые и специалисты: М.Г. Гуськов, В.Г. Макаров, Л.С. Ситченко, В.Н. Соколовский, А.П. Фомин и другие. Ю.М. Брусельницкий выполнил полный комплекс исследований и опытно-конструкторских работ в области судовых коалесцирующих нефтewодяных сепараторов типа СК [10], отличившихся высокой эксплуатационной надежностью. В свое время они были внедрены в производство и долго применялись на различных типах судов и кораблях.

Из зарубежных исследований уместно упомянуть известную работу [11] гидромехаников на крупномасштабном макете грузовой системы танкера, содержащем сепаратор воздуха, в цистерне с конструктивным набором (оробренной). Эксперимент был связан с моделированием процессов максимальной зачистки жидкости в судовых цистернах в сложных условиях.

Вопросы выбора оптимальной конструкции сепарационного аппарата для определенных условий эксплуатации с целью совершенствования оборудования систем или повышения конкурентоспособности изделий неизменно актуальны для разработчиков и производителей рассматриваемой продукции. Необходимость анализировать эффективность применения сепарационного аппарата в той или иной судовой системе на стадиях жизненного цикла судов регулярно возникает у проектантов судов и эксплуатирующих организаций.

Аналитические и экспериментальные исследования, выполненные НИИ «ЛЮТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» совместно с Государственным морским техническим университетом (ГМТУ), а также заинтересованными предприятиями судостроительной промышленности в рассматриваемой области науки и техники, позволяют ответить на ряд специфических вопросов, периодически возникающих в процессе выбора или принятия рациональных конструктивных решений по сепарационным аппаратам.

Приведенные описания различных сепарационных установок и аппаратов показывают, что ключевым звеном в обеспечении их эффективной работы является совершенство конструкции непосред-

ственно сепаратора, выполненного в виде емкости, блока, модуля, циклона и т.п. конструкций. В ряде рассмотренных систем для ускорения процессов сепарации и повышения эффективности разделения жидкой газонасыщенной среды на фазы дополнительно применяют системы вакуумирования, содержащие в составе как вакуумные насосы, так и струйные аппараты – эжекторы.

Поэтому из широкого спектра исследований в области совершенствования оборудования судовых систем и систем судовых энергетических установок, взаимосвязанных с преобразованием применяемых гетерогенных жидких сред, в настоящей работе представлены результаты исследований поведения двухфазных потоков внутри унифицированных сепарационных емкостей, содержащих типовые или вспомогательные элементы разделителей смешанного потока на самостоятельные фазы.

Исследование процессов поведения потоков двухфазных жидкостей и некоторых возможных методов управления процессами разделения аэрированного потока на самостоятельные фазы в указанных условиях осуществлялось на универсальном гидравлическом стенде для исследования эффективности и надежности оборудования судовых систем и трубопроводов. Общий состав модифицируемого комплектующего оборудования данной экспериментальной установки и ее подробное описание содержатся в работе [12]. В данном случае приведены принципиальная схема конкретного рабочего участка и иллюстрации комплектующего оборудования и оснастки экспериментальной установки, относящиеся к испытаниям сепарационных устройств.

Комплекс работ предусматривал испытания модифицируемого макета, охватывающего пространственные типы сепарационных устройств, совместно с макетом участка приемного отрезка судовой системы и вариативных фрагментов набора цистерн. Программой исследований предусматривались последовательные испытания макетов на рабочем участке гидравлического стенда. Схема размещения и внешний вид макета судового вакуумного сепарационного устройства приведены на рис. 5 и 6 (см. вклейку).

Рабочий участок испытательного стенда позволял выполнять исследования широкого спектра гидравлических аппаратов и устройств и обеспечивал приемлемые условия моделирования процессов протекания несжимаемой жидкости внутри проточных частей оборудования или элементов.

Критерии моделирования определялись в соответствии с методологией классической теории размерностей [13]. Масштаб рабочего участка гидравлического стенда и исследуемых макетов определен с учетом соблюдения критериев подобия Re , Fr и Sh и составлял приблизительно 1:5 по отношению к широкой линейке применяемых крупногабаритных сепараторов.

Следует отметить, что учет рассчитанных по методологии [13] критериев моделирования в необходимых диапазонах параметров пространственных потоков, селективно или в совокупности, позволяет достаточно корректно моделировать по воде рассматриваемые процессы, происходящие как в трубопроводах и оборудовании судовых балластных систем, так и при аналогичных условиях течения нефти по трубопроводам грузовых систем наливных судов.

Этот удобный в экспериментальной практике механики жидкостей аспект учитывали, например, специалисты фирмы «Драйсдел» при моделировании процессов зачистки нефти в цистернах танкера по воде, с соблюдением критериев Re и Fr , на масштабной модели грузовой системы танкера дедвейтом 50 000 т [11]. Усовершенствования многочисленных объектов, полученных ранее таким способом различных аппаратов, в последующем получили подтверждение их эффективности в реальных условиях эксплуатации.

Отметим характерные особенности операций, проявившиеся закономерности и важные нюансы испытаний. Модификация макета сепарационной емкости была произведена как в отношении изменения ее внутреннего сечения в плане, так и по вертикали. В процессе выполнения предварительных опытов с рядом модификаций макетов, развитых по горизонтали или вертикали, однокамерных либо многокамерных, а также комбинированных не было выявлено принципиальных отличий в процессах внутреннего взаимодействия гетерогенных пространственных потоков. Поэтому за основу в исследованиях принята модель аппарата, имеющая вертикально расположенную сепарационную емкость цилиндрического типа, т.е. с внутренней полостью кругового сечения в плане.

Учтено также сравнительно широкое применение подобных конструкций в промышленных установках. Монтаж макета вакуумно-сепарационного устройства контролировался по уровню в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Вместе с тем при необходимости предусматривалась возможность установки сепарационной емкости и с откло-

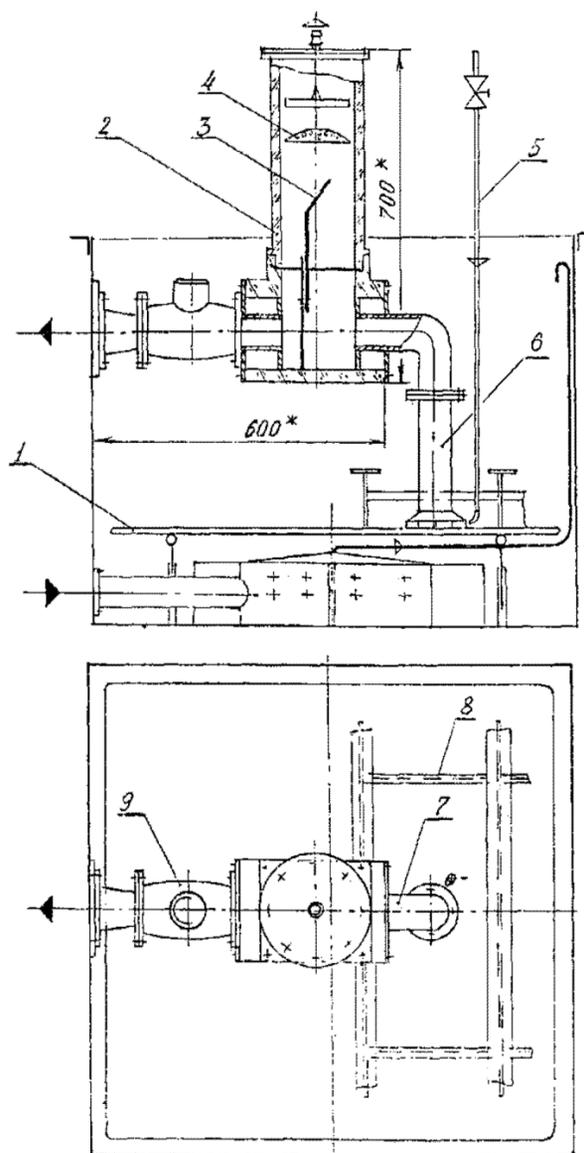


Рис. 5. Схема размещения макета вакуумного сепарационного устройства на рабочем участке гидравлического стенда:

- 1 – подвижное регулируемое дно; 2 – корпус сепарационной емкости; 3 – трансформируемая перегородка; 4 – концентратор воздуха;
- 5 – воздушный трубопровод; 6 – приемное устройство; 7 – приемный трубопровод;
- 8 – макет набора; 9 – расходомер

Fig. 5. Layout of vacuum separator dummy at hydraulic test rig:

- 1 – movable bottom; 2 – separation reservoir body;
- 3 – transformable barrier; 4 – air concentrator;
- 5 – air duct; 6 – receiver; 7 – receiving line;
- 8 – dummy framing; 9 – flow meter

нениями от вертикальной оси, поскольку в реальных условиях эксплуатации сепарационные емкости судовых установок испытывают пространственные отклонения от вертикали, обусловленные качкой судна при морском волнении.

Положение подвижного дна рабочего участка фиксировалось в соответствии с заданным кольцевым зазором для приемных патрубков с различными конструкциями периферийных участков (раструбов) всасывающих трубопроводов. Макет конструктивно-го набора размещался так, чтобы приемный патрубок находился в центре одной из смежных шпаций набора. Такое размещение обеспечивало возникновение естественной устойчивой вихревой воронки, образующейся в толще воды, через которую воздух снаружи поступал в приемный отросток. Кроме того, испытательный стенд и масштабная модель судовой цистерны, содержащей конструктивные связи, позволяли в соответствии с программой испытаний от магистрали рабочего воздуха принудительно вводить определенные порции воздуха как непрерывно, так и дозированно через приемный отросток со всех сторон по периферии приемного раструба.

Замеры параметров потока производились при установившихся режимах работы насоса, стабилизировавшихся процессах и равномерностях поступления объемов сепарации воздуха. Скорость потока определялась расчетным путем на контрольном участке – в выпускном патрубке сепарационной емкости макета. При необходимости скорость потока определялась как в приемных отростках, так и во всасывающем патрубке насоса. Скорости в выпускном, а также во всасывающем патрубке насоса варьировались от 0 до 2 м/с, с определенным интервалом и точностью измерения 0,1 м/с.

Скорость потока в приемных отростках доводилась до 4 м/с, что в практике дебалластировки судовых цистерн может иметь место при отключении отдельных или ряда приемных отростков трубопроводов разветвленной балластной системы (линейной либо кольцевой), примыкающих к всасывающей магистрали. Изменение скоростей потоков осуществлялось с помощью регулирования подачи насоса, а значения скорости определялись по расходомеру с достижимой точностью 0,1 м/с. Давление вакуумирования варьировалось от 0 до $P = -50$ КПа. Как выяснилось уже в процессе экспериментов, применение более глубокого разрежения среды в сепарационной емкости не требуется.

Экспериментальный стенд позволял без ограничений вести всесторонние наблюдения за внутренними процессами и явлениями. Оно осуществ-

лялось как визуально, сквозь прозрачные стенки корпусов сепараторов при естественном освещении, так и с помощью контрольной рефлекторной подсветки, в ряде случаев в поляризованном свете. Линии токов при необходимости определялись съемками происходящих процессов с различными скоростями по траекториям мелких пузырьков.

Первым подвергся испытаниям макет судового вакуумно-сепарационного устройства с сепарационной емкостью, встроенной в приемную магистраль судовой балластной системы, без внутренней «начинки» и отклонений от вертикальной оси. По завершении очередного этапа общей программы испытаний и определения приемлемых габаритов и объема емкости, а также отработки общей конструкции макет модифицировался главным образом в части исследований влияния внутренних устройств для разделения воздуха и жидкости. Для этого на рабочем участке монтировалась очередная модификация внутреннего устройства макета.

В соответствии с классификацией [14] измерения параметров сред (скорости потоков, расхода воздуха и значения вакуумирования, размеров пузырьков) относятся к простым равноточным. Для данного типа измерений оказался применим принцип арифметического среднего, как частного случая метода наименьших квадратов. Доверительный интервал определяется по функции нормального распределения. Количество измерений рассчитывалось по методике [14], исходя из доверительной вероятности 95 %, и составляло не менее 10.

Предварительные испытания макета судового вакуумно-сепарационного устройства с сепарационной емкостью продемонстрировали широкие возможности испытательного стенда и макета в моделировании и исследовании процессов сепарации воздуха, поступающего по всасывающим магистралям, т.е. в избыточно азрированном пространственном потоке воды в относительно стесненных емкостях. Последними, как уже упоминалось, по условиям эксплуатации оснащаются судовые типы сепараторов, с помощью известных технических решений.

Испытания, прежде всего, показали, что управление быстротечными процессами сепарации воздуха при заданных номинальных режимах работы насоса является чрезвычайно сложной задачей. Учитывая полученные результаты предварительных экспериментов, последующие испытания внутренних устройств для выделения фаз из смешанных пространственных потоков осуществлялись последовательно, поэлементно или фрагментарно, при-

нимая во внимание особенности конструкций и складывающиеся «картины» процессов.

Применяемые в распространенных зарубежных и отечественных конструкциях сепараторов [6, 7] технические решения (варьирование сечений впускного и выпускного отверстий, разнесение последних по разным уровням, различное разделение внутренних полостей и иные новшества) оказались неэффективными при скоростях потока во впускном отверстии вакуумируемой сепарационной емкости свыше 0,7 м/с.

Положительным аспектом при этом явилось лишь снижение зависимости процессов при отклонениях сепарационной емкости от вертикальной оси, что объясняется инерциальными факторами. При меньших скоростях потока во впускном отверстии использование конструктивных воздействий, подобных применяемым на практике и описанным выше, практически не требуется.

Процесс концентрации и выделения воздуха из аэрированной воды при соотношениях сечений впускного и выпускного отверстий 1:2 и более в развитой по горизонтали и вертикали сепарационной емкости происходит самопроизвольно. Однако массогабаритные показатели (а следовательно, и ценовые значения) аппаратов возрастут так, что могут стать неприемлемыми, в т.ч., по условиям размещения в насыщенных оборудованьем машинных помещениях судов или плавсооружений с разветвленными балластными системами.

По результатам экспериментов были разработаны новые технические решения и конструкции для разделения гетерогенной среды в соответствии с обозначенными выше задачами. Для исследования эффективности и отработки новых конструкций макет был доработан, а внутренние конструкции сепаратора существенно модифицированы. Программа испытаний макета была значительно расширена. В нее включили испытания широкого спектра новых внутренних устройств для интенсификации процессов сепарации воздуха, разработанных вместо известных, широко освещенных в технической литературе и проспектах конструкций, однако по результатам испытаний на разных режимах не подтвердивших ожидаемую эффективность.

В процессе исследований макет модифицировался не только для оценки существующих конструкций, предназначенных по замыслам конструкторов известных аппаратов управлять эффективностью процессов разделения структур смешанных потоков жидких и газообразных сред, но и для достижения оптимальных конструктивных решений

по результатам всего комплекса испытаний. Для получения корректных результатов методика испытаний также была адаптирована к новым конструкциям, усовершенствованным с учетом сложных распределений пространственных потоков и быстротечности процессов.

Исследования показали, что оптимальным рабочим диапазоном давлений вакуумирования является $P = -(20 \div 30)$ КПа. Это, в частности, не противоречит средним показаниям, отраженным в спецификации сепарационной установки фирмы Thune-Eureka A/S. Повышение значения вакуумирования выше отмеченного диапазона приводит к уменьшению диаметра пузырьков, хаотическому их распространению по всему объему жидкости во внутренней полости сепаратора и ухудшению процесса их выделения. Понижение разрежения по отношению к означенному диапазону давлений вакуумирования отрицательно влияло как на процессы слияния, так и на скорость выделения и всплытия пузырьков.

Испытания макета судового вакуумно-сепарационного устройства

Tests of marine vacuum separator dummy

Наиболее характерные проявляющиеся и представляющие практический интерес схемы или фрагменты реализующихся в контуре сепарационной емкости процессов, в зависимости от параметров пространственных потоков, внутренних условий и применяемых конструктивных трансформируемых воздействий, а также краткие описания явлений, происходящих внутри сепарационной емкости при различных условиях, представлены на рис. 7.

В начале статьи было отмечено, что проверка различных технических решений, используемых в зарубежных сепарационных установках, показала их низкую эффективность не только на режимах, близких к номинальным, но и на долевых режимах работы судовых насосов. Представленные материалы экспериментов позволяют сделать выводы об эффективности применяемых конструктивных решений по управлению процессами разделения аэрированных пространственных потоков на отдельные фазы.

При скорости потока во впускном патрубке сепарационной емкости в пределах 2 м/с поступившая через вихревую воронку в приемном отростке всасывающей магистрали судовой системы воздушная

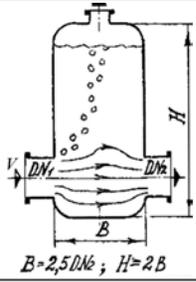
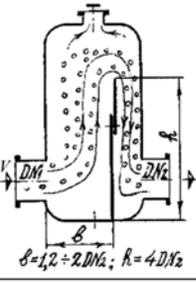
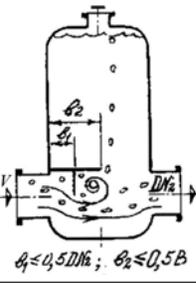
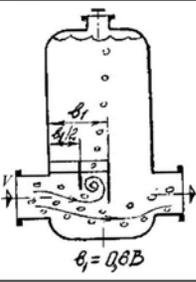
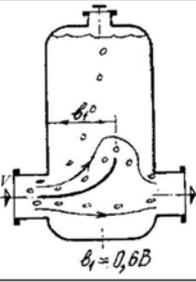
| № варианта | Исследуемая конструкция | Параметры потоков | Характеристика процессов |
|------------|--|--|---|
| 1 |  <p>$B = 2,5 DN_2; H = 2B$</p> | $P = -(20 \div 30)$ КПа $V = 0,1 - 0,6$ м/с | Пузырьки воздуха, минуя выпускной патрубков, свободно выделяются из потока, всплывают на поверхность раздела сред и удаляются из сепаратора |
| 2 |  <p>$b = 1,2 \cdot 2 DN_2; h = 4 DN_2$</p> | $P = -(20 \div 30)$ КПа $V = 0,75 - 0,85$ м/с | При скорости потока $V = 0,75$ м/с пузырьки измельчаются до диаметра 3–4 мм, рассредотачиваются по толщине потока. При скорости $V = 0,85$ м/с и выше массы пузырьков огибают перегородку независимо от ее высоты, профиля и отстояния от внутренней стенки и вовлекаются в выпускной патрубков (DN_2) |
| 3 |  <p>$b_1 \leq 0,5 DN_2; b_2 \leq 0,5 B$</p> | $P = -(20 \div 30)$ КПа $V = 1$ м/с, $V \leq 2$ м/с | При скорости $V = 2$ м/с за уступом, помещенным за впускным патрубком или поперечной пластиной конечной длины и ширины, на кромке верхней пластины образуется поперечный вихрь. В ядре вихря концентрируются, сливаются и укрупняются воздушные пузырьки. Крупные пузырьки (10 мм и более) всплывают вверх. Более мелкие увлекаются в выпускной патрубков. Снижение скорости до 1 м/с и более резко уменьшает интенсивность вихря и эффективность сепарации |
| 4 |  <p>$b_1 = 0,6 B$</p> | $P = -(20 \div 30)$ КПа $V = 1 - 2$ м/с | Различные модификации конструкции уступа по варианту 4 не повышают эффективность сепарации воздуха, т.к. средний аэрированный слой жидкости на выходе из впускного патрубков отклоняется вниз, огибает уступ и вовлекается в выпускной патрубков |
| 5 |  <p>$b_1 = 0,6 B$</p> | $P = -(20 \div 30)$ КПа $V \geq 1$ м/с | Плоские направляющие потока параболического профиля, перекрывающие до 2/3 поперечного сечения полости сепаратора, на скорости до 1 м/с отсекают часть аэрированного потока и способствуют выделению некоторой доли пузырьков. Значительная часть пузырьков огибает кромки направляющих и уходит в выпускное отверстие |

Рис. 7. Схемы и фрагменты реализующихся в контуре сепарационной емкости процессов в зависимости от параметров пространственного потока, внутренних условий и применяемых конструктивных воздействий
Fig. 7. Layouts and fragments of the processes taking place in the separation reservoir depending on 3D flow parameters, internal conditions and structural effects applied

масса в процессе движения по трубопроводам измельчается до диаметра пузырьков $d = 4$ мм и менее и перемешивается с общим потоком жидкости.

Разобшенная пузырьковая масса поступает в сепарационную емкость и при рекомендуемом в зарубежной практике [15] давлении вакуумирования $P = -25$ КПа хаотически перемещается во внутренней полости, беспрепятственно отражается и огибает любые преграды и устройства. Среди них: непроницаемые, перфорированные или профилированные перегородки различной высоты, кассеты с сетчатыми и иными проницаемыми наполнителями, восходящие спиральные дорожки, циклоны и другие приспособления, проиллюстрированные на рис. 1–3. Как показали эксперименты, пузырьковая масса с легкостью преодолевает подобные искусственные препятствия и еще более измельчается в кассетах, а затем беспрепятственно вовлекается во всасывающую полость насоса, вызывая кавитационные эффекты и, как правило, блокируя его работу.

В свободной емкости (без внутренней «начинки») определенных размеров при скоростях потока во впускном патрубке до 0,6 м/с пузырьки самопроизвольно всплывают по параболической траектории вверх и выделяются на поверхности раздела сред (рис. 7, вариант 1).

Значительное внимание в процессе исследований было уделено устройствам, основывающимся на вихревых эффектах (рис. 7, варианты 3 и 4). Оказалось, что эффективность работы вихреобразователя зависит от конструкции и скорости потока. При неудачной конструкции и расположении завихрителя потока образующаяся вихревая зона отражает набегающий поток или содействует образованию аэрированной пелены и ускоряет доставку ее к выпускному патрубку.

Были проведены испытания и ряда других промежуточных вариантов. Эксперименты показали, что вихри, индуцированные преградами, помещенными поперек потока на определенном расстоянии за впускным патрубком, создают т.н. вихревой шнур, подвижный и видоизменяющийся, который тоже вовлекается в часть общей пузырьковой массы. Как показали эксперименты, объем газа, содержащийся в вихревом шнуре, вновь вовлекается в общий поток в выпускном отверстии (патрубке), дополнительно безвозвратно аэрируя его. Суть возникающих проблем заключается в невозможности управлять и каким-либо образом воздействовать на последующее улавливание и отведение газовой составляющей потока в общую верхнюю газовую вакуумируемую полость.

С учетом результатов экспериментов разработаны и апробированы устройства для обработки аэрированного потока и выделения из него воздушной фазы. В частности, положительные результаты достигаются при организации потока таким образом, что вначале поток ориентируется по траектории самопроизвольного выделения пузырьков (рис. 7, вариант 5), а затем обрабатывается в специальном устройстве на строго определенном расстоянии выше уровня впускного и выпускного патрубков.

Ряд разработанных и апробированных в процессе многочисленных экспериментов методов по эффективной доставке пузырьков ближе к поверхности раздела сред при скоростях потоков 0,6–1,0 м/с (например, по приближенным траекториям самопроизвольного выделения пузырьков) с помощью специальных устройств позволяет управлять процессами распределения смешанных потоков среды в начале их пути внутри емкости.

Однако результаты испытаний подобных конструкций оказались совершенно отличными от традиционно применяемых и признанных эффективными. При этом общие или даже универсальные «рецепты» как при стабильных конструктивных параметрах емкостей и стационарных режимах потоков, так и при различных соотношениях размеров внутренних полостей или насыщениях сепараторов описанными выше или оригинальными конструктивами не проявлялись.

В ряде зарубежных вакуумно-сепарационных установок, например Eureka-Strip System (рис. 4), используются сферические концентраторы всплывающих воздушных пузырьков, размещаемые в сепарационной емкости выше уровня впускного и выпускного патрубков. Исследования эффективности аналогичных конструкций, плоских различного диаметра, конических или сферических с различной пространственной кривизной поверхности, с вариациями диаметров отверстий их схемой и плотностью распределения, а также расположением по площади, в процессе испытаний показали, что и они не оправдывают своего назначения.

Один из вариантов макетов концентратора воздуха приведен на рис. 5, поз. 4. При размещении концентратора непосредственно над впускным патрубком концентратор работает как отражатель потока. При перемещении вверх на высоту более размера номинального диаметра DN_2 (рис. 7) в образовавшемся свободном пространстве развивается вертикальный вихревой поток, в котором воздушные пузырьки измельчаются и снова перемешива-

ются с общим аэрированным потоком в трудноразделимую двухфазную среду.

Испытания показали также, что проницаемость концентратора воздушными пузырьками существенно зависит от диаметра отверстий. До 5 мм проницаемость весьма низкая, и под концентратором образуется воздушная подушка, из которой при достижении определенного объема воздушная масса порциями вновь вовлекается в основной поток. Аналогичный эффект, кстати, проявляется при прохождении (по физической сути, продавливании) двухфазного потока сквозь перфорированные перегородки или кассеты. Удовлетворительная проницаемость достигается лишь при диаметре отверстий 10 мм (рис. 8, см. вклейку) и несколько более. Никаких иных положительных эффектов у часто применяемых в сепарационных установках концентраторов различных форм (плоской, сферической, конической, а также иных пространственных) комплексные испытания данных устройств в нашем случае не выявили.

Иначе обстоят дела в отношении новых, разработанных на основании выполненных экспериментов, устройств для управления процессами сепарации, иных технических решений и внутренних конструктивных вариантов со сложной пространственной конфигурацией, для которых потребовались аналитические исследования оптимальности формирования потоков с заданной структурой при определенных граничных условиях. Такие исследования позволяют определить основные параметры внутренних устройств сепарационных емкостей для заданных условий эксплуатации аппаратов, физических свойств жидких сред и последующих гидравлических испытаний на эффективность, а также необходимой доработки по результатам общих итераций и воплощения в промышленный образец.

Исследования показали также, что в судовых эжекторных установках, обеспечивающих вакуумирование сепарационной емкости и зачистку жидких сред в цистернах, подача эжектора, типа широко применяемых в судовых системах [16] и запитываемых от судовых средств рабочими жидкостями с одинаковыми свойствами, находится в пределах 10 % от подачи основного насоса.

Из результатов экспериментов вытекает, что достигнуть оптимального или, по крайней мере, приемлемого управления процессами разделения гетерогенной среды на моногенные в аппаратах даже с типовыми сепарационными емкостями в принципе осуществимо. Применение умозрительных методов конструирования или типовых кон-

струкций, какими бы привлекательными они ни были, на деле не гарантирует последующей эффективности и тем более оптимальности.

По результатам испытаний не выявлена актуальность определения аналитических зависимостей параметров потока и закономерностей, имеющих важное практическое значение, для простых конструкций, тем более уже примененных в упомянутых выше промышленных системах (например, зависимости диаметров пузырьков от скорости потоков в том или ином варианте сепараторов газов). Практическую значимость в данных случаях представляют конкретные значения скоростей потока, характеризующие переходные режимы работы сепараторов от самопроизвольного выделения пузырьков до максимально возможной принудительной сепарации создаваемого аппарата.

Представленные материалы экспериментов, разумеется, являются далеко не полными и тем более исчерпывающими, однако позволяют сделать выводы об эффективности применяемых конструктивных решений по управлению процессами разделения аэрированных потоков на отдельные фазы и дополнить известные представления о взаимодействиях гетерогенных пространственных потоков жидких сред с различными препятствиями.

Выполненные исследования объективно показали не только высокую сложность, но и несовершенство применяемых сепараторов. Основная причина заключается, по-видимому, в еще недостаточной исследованности процессов сепарации гетерогенных потоков в относительно замкнутых контурах рассматриваемых аппаратов и особенно эффективности применяемых преобразователей и разделителей многофазных жидкостей. С помощью проведенных опытов продемонстрированы некоторые современные научно-технические методы и подходы, которыми необходимо руководствоваться при принятии решений о применении рассматриваемого сепарационного оборудования, его модернизации и тем более при актуальности создания нового, более совершенного. Нарботанный экспериментальный материал может быть полезен для выработки недостающих технических требований и правил для применения в действующей нормативной документации на судовые системы и сепарационное оборудование.

Вместе с тем на основе результатов серий испытаний популярных конструкций и разработанных технических решений в области сепарационного оборудования в случае востребованности Крылов-

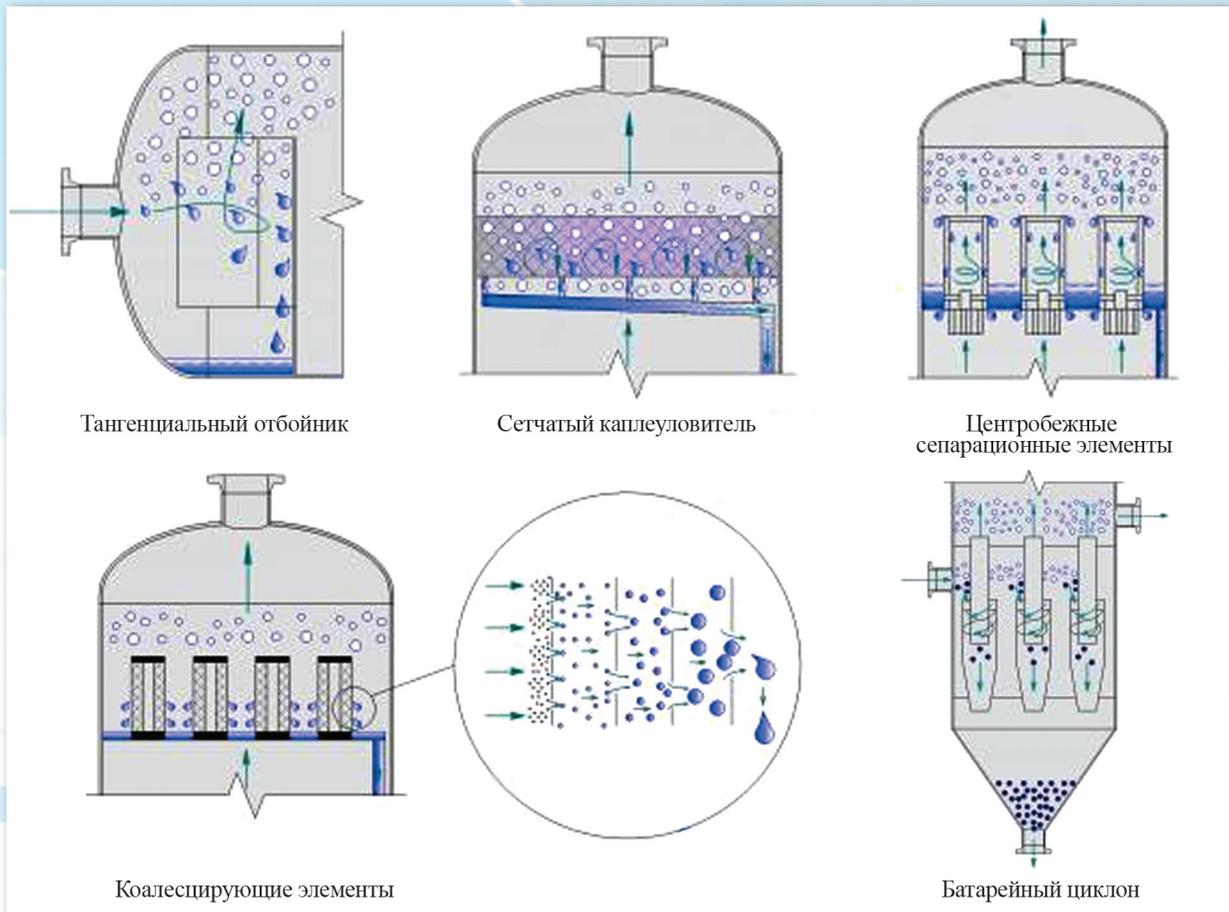


Рис. 1. Типовые конструктивные схемы, применяемые во внутренних полостях промышленных сепараторов
Fig. 1. Typical designs of internal cavities for industrial separators

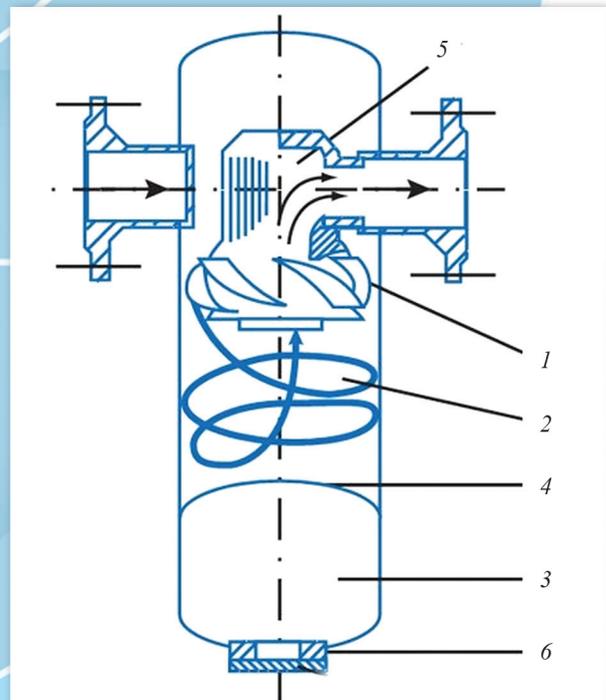


Рис. 2. Принципиальная схема потоков внутри циклонного сепаратора типа ARIACOM
Fig. 2. Principal chart of the flows inside ARIACOM-type cyclone separator

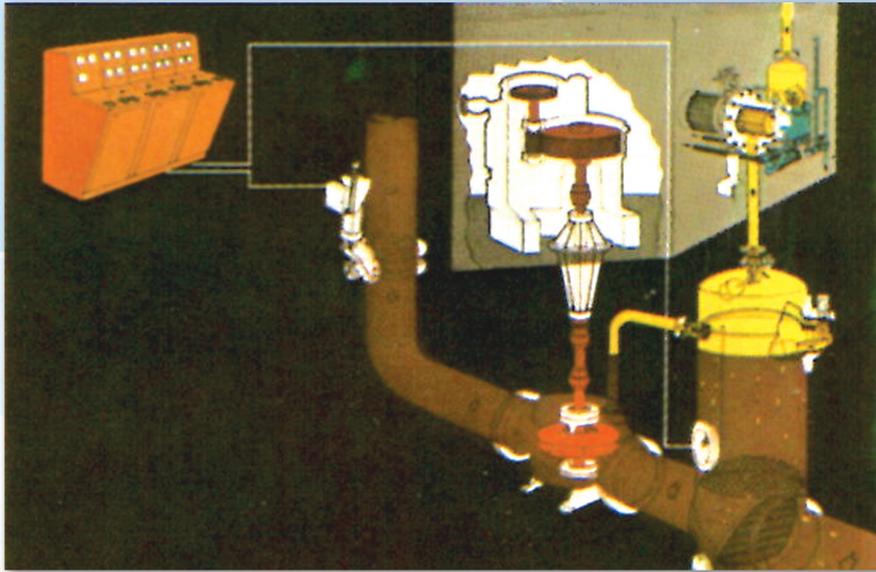


Рис. 4. Судовая автоматизированная сепарационная установка типа Thune-Eureka PA в действии в составе грузовой или зачистной систем танкера

Fig. 4. Thune-Eureka PA automated marine separator as part of tanker cargo handling or stripping system



Рис. 6. Макет вакуумного сепарационного устройства, смонтированный на рабочем участке гидравлического стенда

Fig. 6. Vacuum separator dummy at hydraulic test rig

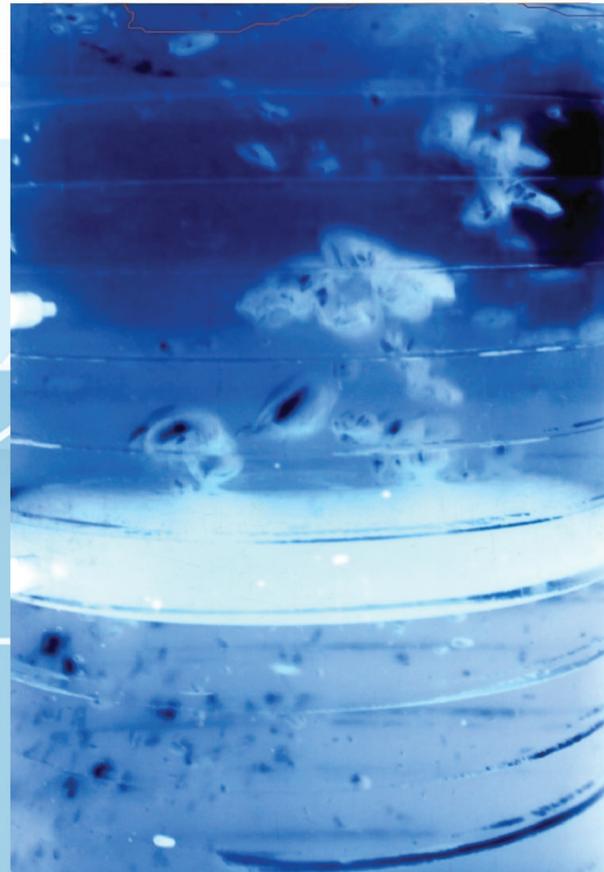


Рис. 8. Фрагмент процесса укрупнения пузырьков воздуха в сепарационной емкости при прохождении концентратора сферической формы, перфорированного по определенной версии распределения и форме отверстий

Fig. 8. A fragment of air bubble coalescence in the separation reservoir during flow passage via a spherical concentrator perforated to specific hole distribution and shape

ский центр может разработать типоразмерный ряд и необходимые исполнения судовых или иного промышленного назначения вакуумно-сепарационных устройств. При этом данные аппараты будут относительно компактными и несложными в изготовлении, с доступной автоматикой запуска (и отключения за ненадобностью) процесса сепарации, а также существенно более простыми и гидравлически совершенными, чем многочисленные разрекламированные установки, повсеместно применяемые в зарубежном судостроении и российских отраслях промышленности.

Объем сепарационных емкостей и присоединительные размеры впускного и выпускного патрубков принципиально могут соответствовать подачам 160, 250 и 400 м³/ч, широко используемым в судовых системах балластных насосов, и, разумеется, этот типоряд производительностей не предельно. Ввиду относительной несложности конструкции такой сепаратор может изготавливаться машиностроительной частью судостроительных заводов.

Список использованной литературы

1. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. 5-е изд., перераб. Москва : Наука, 1978. 736 с.
2. *Веселов Ю.С., Лавров И.С., Рукобратский Н.И.* Водоочистное оборудование: конструирование и использование. Ленинград : Машиностроение, 1985. 232 с.
3. ТУ 8351-076-00217298-96. Сепараторы нефтегазовые. Технические условия.
4. Нефтегазовые сепараторы НГС [Электронный ресурс] // Завод «Нефтегазоборудование» : [сайт]. Саратов, 2021. URL: <https://ngosar.ru/neftyanoe-oborudovanie/nf-sep.html> (дата обращения: 15.04.2020).
5. Циклонные сепараторы сжатого воздуха [Электронный ресурс] // ARIACOM : [сайт]. [S. 1.], 2021. URL: https://ariacom.ru/catalog/ciklonnye_separatory_ariacom/ (дата обращения: 12.09.2020).
6. *Геец В.М.* Специальные системы наливных судов. Курс лекций / Морской гос. ун-т им. Г.И. Невельского. Владивосток, 2012. 184 с.
7. *Родионов Н.Н.* Современные танкеры. Ленинград : Судостроение, 1980. 277, [6] с.
8. *Макаров В.Г.* Специальные системы судов-газовозов. Санкт-Петербург : СПбГМТУ, 1997. 470, [1] с.
9. *Шаманов Н.П., Дядик А.Н., Лабинский А.Ю.* Двухфазные струйные аппараты. Ленинград : Судостроение, 1989. 239, [1] с.
10. *Брусельницкий Ю.М.* Судовые устройства очистки трюмно-балластных вод от нефтепродуктов. Ленинград : Судостроение, 1966. 201 с.
11. *Paterson S.* Cargo Oil Tankers: leaflet: C-8 / Drysdale and Co. Reprint. Glasgow, 1964. 20 p.
12. *Штода А.И.* Совершенствование принципов проектирования судовых трюмных и балластных систем: автореф. дис. канд. техн. наук / Ленингр. кораблестроит. ин-т. Ленинград, 1990. 16 с.
13. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. 8-е изд., перераб. Москва : Наука, 1977. 438 с.
14. *Долинский Е.Ф.* Обработка результатов измерений. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Изд-во стандартов, 1973. 191 с. (Библиотека метролога).
15. PA stripping system for central pump rooms // Eureka products. Thune-Eureka : catalog. S. 1., 2013. S. pag.
16. ОСТ 5P.5033-93. Эжекторы водоструйные. Технические условия.

References

1. *L. Loitsyansky.* Mechanics of fluid and gas. Moscow, Nauka, 1987 (in Russian).
2. *Yu. Veselov, I. Lavrov, N. Rukobratsky.* Water purification equipment: design and operation. Leningrad, Mashinostroyeniye, 1985, 232 pp. (in Russian).
3. TU 8351-076-00217298-96. Oil and gas separators. Technical Specifications (in Russian).
4. NGS oil and gas separators // Web-site of *Neftgazoborudovaniye* plant, Saratov, 2021, URL: <https://ngosar.ru/neftyanoe-oborudovanie/nf-sep.html> (accessed on 15.04.2020) (in Russian).
5. ARIACOM cyclone-type compressed-air separators // Web site of ARIACOM, https://ariacom.ru/catalog/ciklonnye_separatory_ariacom/ (accessed on 12.09.2020).
6. *V. Geets.* Special systems of tankers. Teaching course / Nevelskoy State Maritime University, Vladivostok, Russia, 2012, 184 pp. (in Russian).
7. *N. Rodionov.* Modern tankers. Leningrad, Sudostroyeniye, 1980, 277 [6] pp. (in Russian).
8. *V. Makarov.* Special systems of LNG carriers. St. Petersburg, SMTU, 1997, 470, [1] pp. (in Russian).
9. *N. Shamaov, A. Dyadik, A. Labinsky.* Double-phase jet gears. Leningrad, Sudostroyeniye, 1989, 239 [1] pp. (in Russian).
10. *Yu. Bruselnitsky.* Ship devices for oil removal from bilge and ballast waters. Leningrad, Sudostroyeniye, 1966, 201 pp. (in Russian).
11. *Paterson S.* Cargo Oil Tankers: leaflet: C-8 / Drysdale and Co. Reprint. Glasgow, 1964. 20 p.
12. *A. Shtoda.* Improvement in design principles for ship bilge and ballast water systems. Synopsis of Cand. Sc. Thesis, Leningrad Shipbuilding Institute, 1990, 16 pp. (in Russian).

13. *L. Sedov*. Similarity and dimensionality methods in mechanics. 8th ed., rev. Moscow, Nauka, 1977, 438 pp. (*in Russian*).
14. *Ye. Dolinsky*. Measurement data processing. 2nd ed., rev. and enl. Moscow, Publishing House of Standards, 1973, 191 pp. (Metrologist's Library) (*in Russian*).
15. PA stripping system for central pump rooms // Eureka products. Thune-Eureka : catalog. S. 1., 2013. S. pag.
16. Standard OST 5P.5033–93. Water-jet ejectors. Technical Specifications (*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-я 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, 19th 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: 05.05.22
© Штода А.И., 2022