

### СЕКЦИЯ 3. Гидроаэродинамика и теория корабля

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-57-65

УДК 629.565.2+627.767

EDN: TZNSQS

Д.Е. Фадеев

Научно-исследовательский институт спасания и подводных технологий ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», Санкт-Петербург, Россия

## МЕТОД АВТОСТАБИЛИЗАЦИИ ПО ДИФФЕРЕНТУ ПРИ ПОДЪЕМЕ ЗАТОНУВШИХ ОБЪЕКТОВ СПОСОБОМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОБСТВЕННОЙ ПЛАВУЧЕСТИ

Возросшее число аварий на плавучих доках, в т.ч. с полным затоплением, определяет направление развития методов и методик их подъема. Специалисты НИИ спасания и подводных технологий ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» разработали методику расчета эффекта автостабилизации по дифферену при подъеме затонувших плавучих доков с малых и средних глубин путем восстановления их собственной плавучести, основанную на совместном решении уравнений сил и моментов сил тяжести и плавучести.

Работоспособность методики проверена при разработке проектов подъема затонувших плавучих доков, а также гипотетического плавучего дока с произвольно заданными массогабаритными характеристиками. Методика позволит осуществить безопасный подъем затонувших плавучих доков на малых и средних глубинах и защитить акватории от факторов, оказывающих негативное воздействие вследствие нахождения в них затонувших объектов. Положения в методике применены в проектных организациях, занимающихся разработкой формуляров поисково-спасательного обеспечения строящихся плавучих доков в части, касающейся их подъема в случае аварийного затопления.

**Ключевые слова:** методика автостабилизации, подъем затонувших объектов, ограничение дифферента, плавучий док, балластные отсеки, отжимные трубы, продувка.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

### SECTION 3. Aero-hydrodynamics and ship theory

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-57-65

UDC 629.565.2+627.767

EDN: TZNSQS

D.E. Fadeev

Research Institute of Rescue and Underwater Technologies, N.G. Kuznetsov Naval Academy, St. Petersburg

## SELF-TRIMMING METHOD FOR REFLOATING-BASED SALVAGE OF SUNKEN OBJECTS

Growing number of accidents with floating docks, including those ending up with their complete sinking, makes it necessary to improve methods and procedures of their salvaging. The experts of Research Institute of Rescue and Underwater Technologies (N.G. Kuznetsov Naval Academy) have developed a calculation procedure for self-trimming of sunken objects salvaged from shallow and medium depths as per refloating techniques. This procedure involves simultaneous solution of the equations governing buoyancy and gravity forces and moments.

*Для цитирования:* Фадеев Д.Е. Метод автостабилизации по дифферену при подъеме затонувших объектов способом восстановления собственной плавучести. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; Специальный выпуск 1: 57–65.

*For citations:* Fadeev D.E. Self-trimming method for refloating-based salvage of sunken objects. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; Special Issue 1: 57–65 (in Russian).

This procedure has been validated in real projects related to salvaging of floating docks, as well as in the simulation of salvaging a hypothetical floating dock with arbitrary weight and size. The procedure will enable safe salvaging of sunken floating docks from shallow and medium depths, as well as protect water areas against the harm that such sunken objects might cause. The provisions of this procedure have been applied by dedicated design bureaus developing search and rescue programs for floating docks under construction, with respect to their salvaging in case of emergency sinking.

**Keywords:** self-trimming procedure, salvage of sunken objects, trim restriction, floating dock, ballast compartments, purging pipes, purging.

*The author declares no conflicts of interest.*

Подъем затонувших плавучих доков является актуальной задачей. За последние годы в нашей стране существенно возросло число аварий плавучих доков, в т.ч. с их полным затоплением. Затонувшие плавучие доки создают препятствия для эксплуатации акваторий и загрязняют окружающую среду.

Специалисты научно-исследовательского отдела подъема затонувших объектов НИИ спасания и подводных технологий ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» (далее – Институт) принимали участие в подготовке к подъему и в работах по подъему нескольких затонувших плавучих доков. Разработаны концепция подъема затонувшего плавучего дока ПД-50 [1] и полноценные технические проекты подъема затонувших плавучих доков ПД-64 [2,3] и ПД-16 [4].

Разработка технического проекта подъема любого затонувшего объекта прежде всего предполагает выбор технологии выполнения работ с учетом имеющихся у исполнителя технических средств. Исходя из беспрецедентно больших массогабаритных характеристик затонувших плавучих доков выбор технологии их подъема ограничивается двумя способами:

- разделкой и подъемом плавучего дока по частям с применением специальных технических средств;
- подъемом его целиком с восстановлением собственной плавучести.

Подъем по частям имеет ряд недостатков, включает возможность последующего восстановления затонувшего объекта, а также, при равных условиях, по трудоемкости существенно превышает подъем того же объекта целиком. Условием подъема затонувших плавучих доков целиком является максимально возможное использование при выполнении работ конструктивных особенностей плавучего дока, имеющего множество замкнутых объемов (балластных отсеков). С их помощью удастся быстро и с относительно малыми затратами созда-

вать большие равномерно распределенные подъемные силы, создание которых другими способами либо трудновыполнимо, либо вообще невозможно.

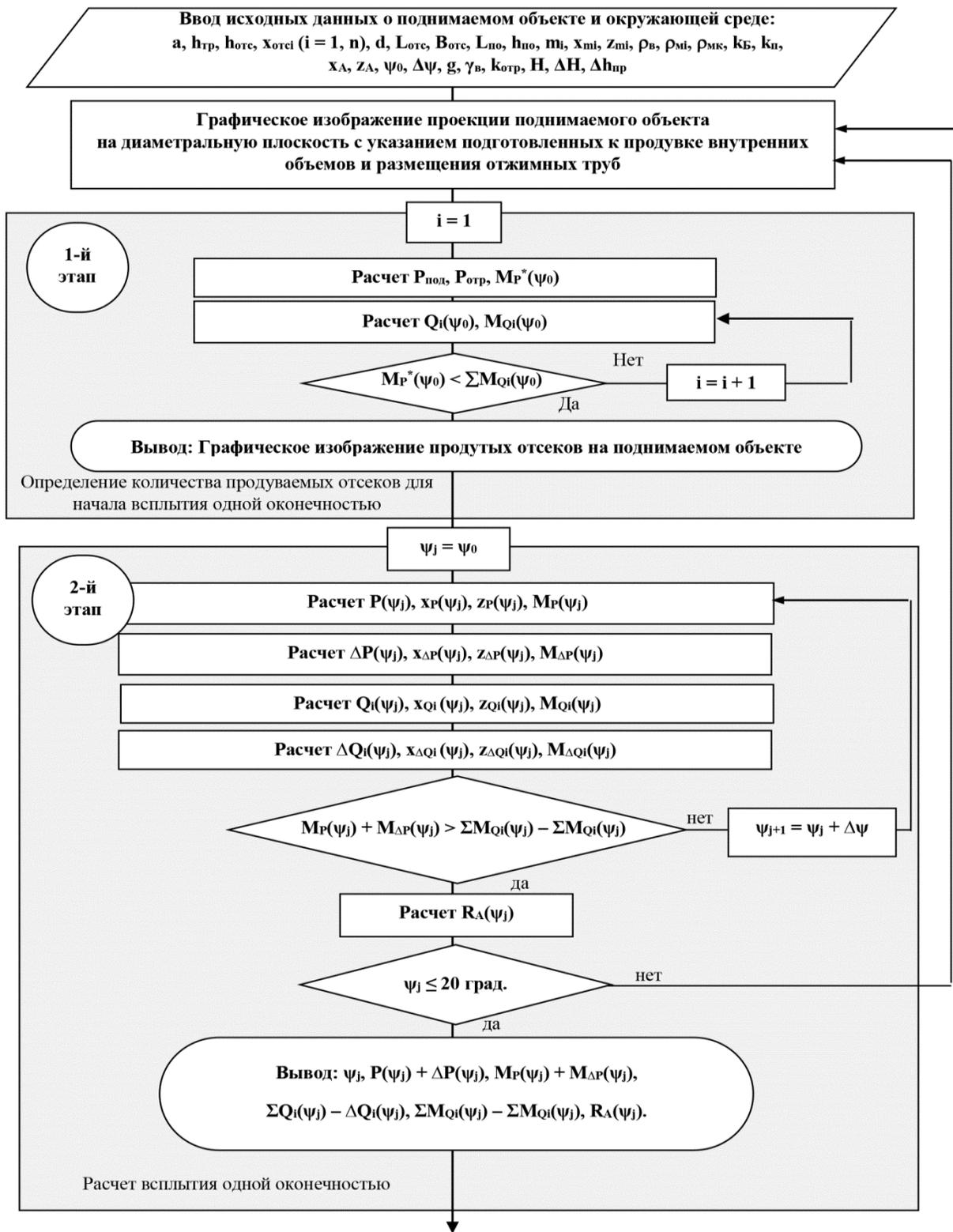
Основным недостатком рассматриваемого способа является динамический характер всплытия затонувшего плавучего дока, сопровождающийся практически мгновенным расширением воздуха в продутых отсеках вследствие падения внешнего гидростатического давления. Рост дифферента вызван смещением воздушных объемов в сторону всплывающей оконечности.

В Институте в рамках НИР «Гиперион-2022» разработана методика расчета эффекта автостабилизации по дифференту при подъеме затонувших объектов путем восстановления их собственной плавучести [5], расширяющая возможности этого способа подъема. Алгоритм методики представлен на рис. 1. Методика основывается на адаптации разработанного в 1990-е гг. метода автостабилизации пространственного перемещения для глубоководного подъема затонувших объектов [6] к условиям подъема с малых и средних глубин.

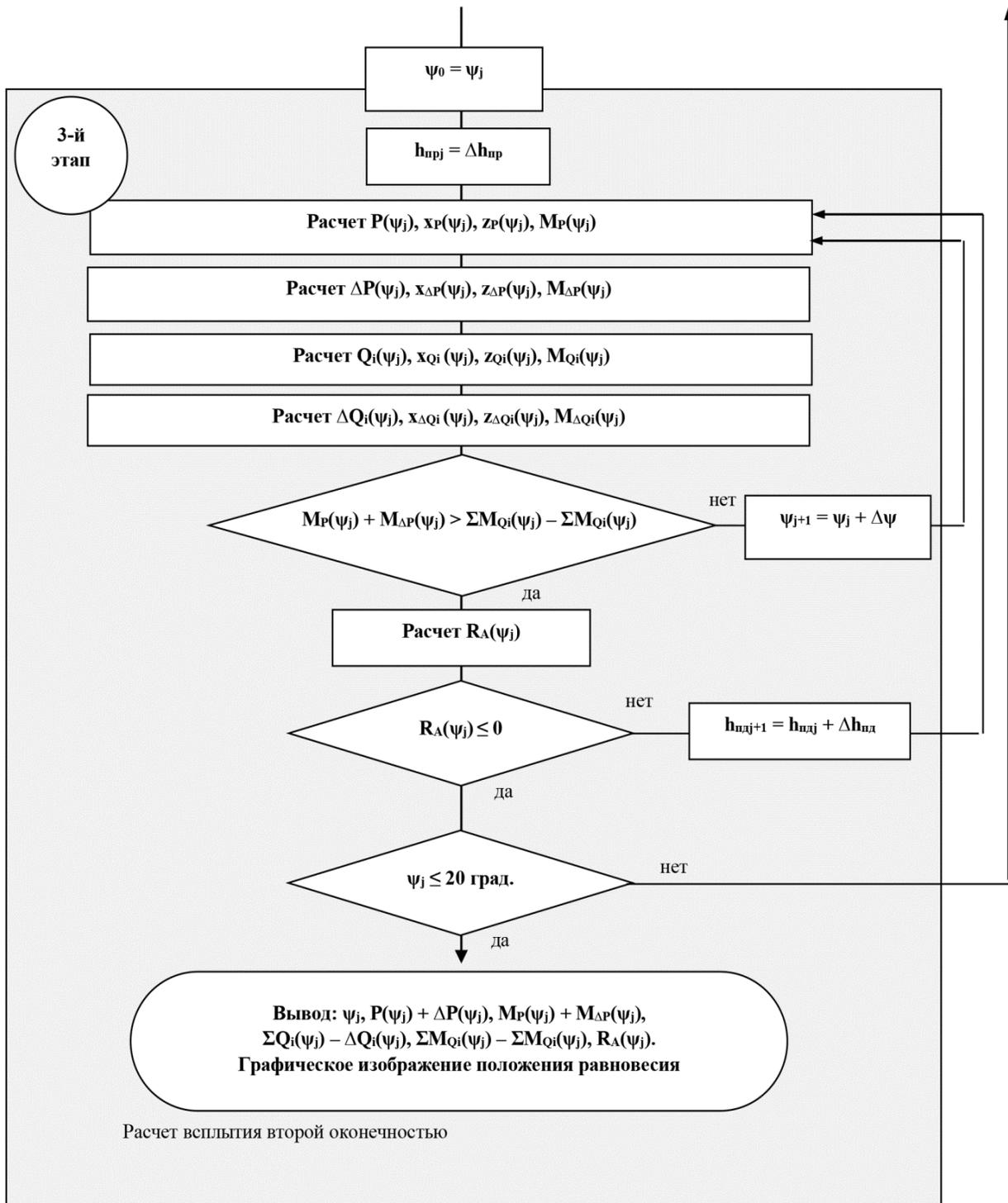
Отличием разработанной методики является замена концевых балластных цистерн со скошенными днищами (рис. 2), создающих внешние силы плавучести, внутренними объемами поднимаемого объекта, которые оборудуются отжимными трубами и продуваются в строго определенной последовательности (рис. 3).

Конструктивно отжимные трубы могут быть одинарными и сдвоенными (рис. 4). Сдвоенная труба предназначена для установки в отсеки, которые на первом этапе подъема предстоит продуть частично, а на завершающем этапе – полностью. Для этого короткий элемент трубы следует перекрыть герметичной крышкой или пробкой.

Методика основана на совместном решении уравнений сил и моментов сил тяжести  $P$  и плавучести  $Q$ . Силы плавучести вычислены в зависимости от формы проекции продутого объема на



Продолжение на следующей стр.



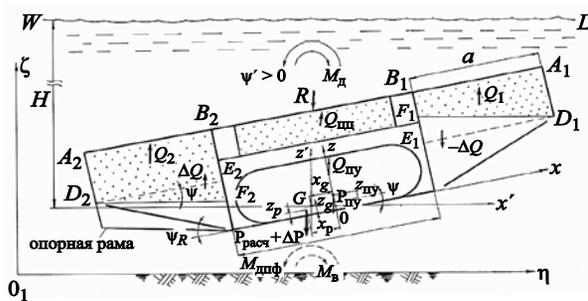
**Рис. 1.** Алгоритм расчета положения равновесия при подъеме затонувшего объекта способом продувки внутренних объемов

**Fig. 1.** Equilibrium calculation algorithm for sunken object salvage by purging the water from its internal volumes

диаметральную плоскость, обусловленной наличием отжимных труб и пространственным положением продутых отсеков, характеризуемых дифферен- том и их расположением относительно поверхности воды (рис. 5). Отдельно учитываются потеря архимедовой силы при выходе из воды части корпуса поднимаемого объекта в момент всплытия и частичная продувка ряда отсеков при подъеме второй оконечности.

Работоспособность указанной методики прове- рена при расчете подъема существующих плавучих доков и гипотетического плавучего дока с произ- вольно заданными массогабаритными характери- стиками, чтобы эффект автостабилизации был наиболее выраженным. Рассмотрен плавучий док длиной 114 м и подъемным весом 4500 тс, который состоит из шести групп прямоугольных централь- ных балластных отсеков, расположенных под ста- пель-палубой длиной 19 м, общей шириной 10 м и высотой 6 м. Глубина подъема не превышает 1/3 длины плавучего дока и составляет 30 м. Графиче- ская схема подъема представлена на рис. 6.

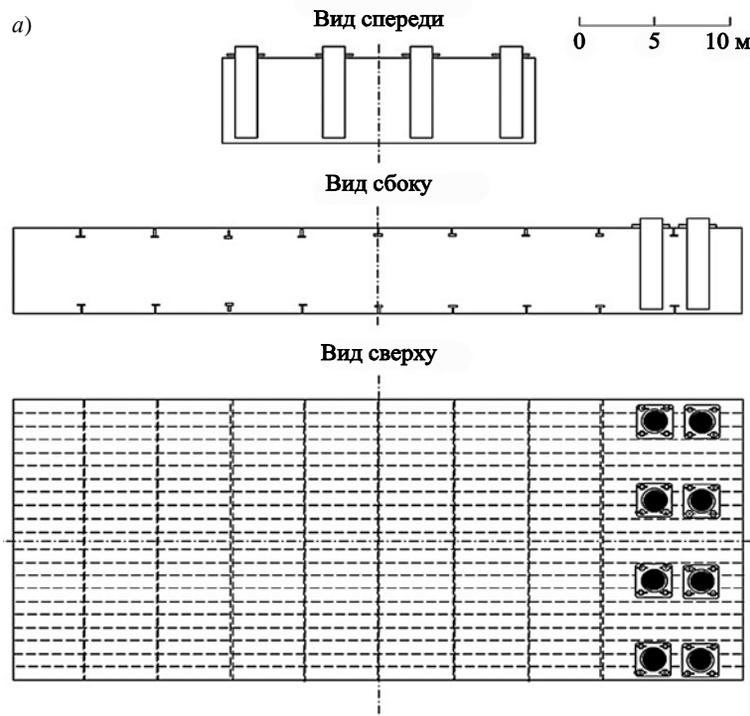
С целью обоснования рационального распо- ложения отжимных труб в отсеках плавучего дока



**Рис. 2.** Схема глубоководного подъема затонувшего объекта с помощью погружаемого крупногабаритного судоподъемного устройства, обеспечивающего эффект автостабилизации пространственного перемещения за счет наличия концевых балластных цистерн

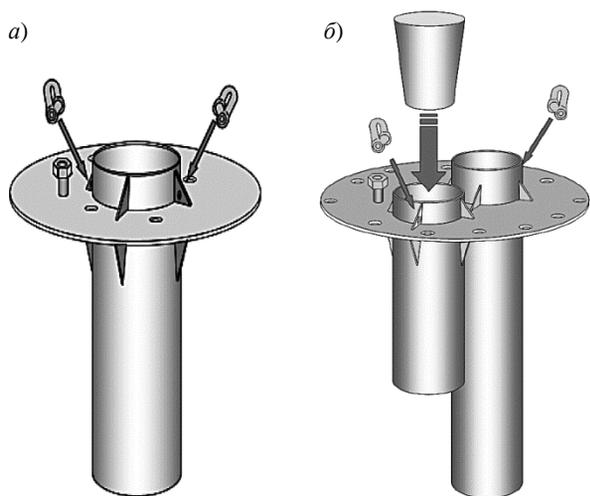
**Fig. 2.** Deepwater salvage of sunken object with a large submersible salvage tool stabilizing the object in space by means of end ballast tanks

выполнен расчет дифферента при всплытии одной оконечности и второй оконечности плавучего дока для 27 расчетных случаев, отличающихся расположением отжимных труб (табл. 1–3).



**Рис. 3.** Предполагаемая схема размещения отжимных труб в балластном отсеке плавучего дока (а) и их конструкция (б)

**Fig. 3.** Possible arrangement of purging pipes in the ballast compartment of floating dock (a) and their design (b).



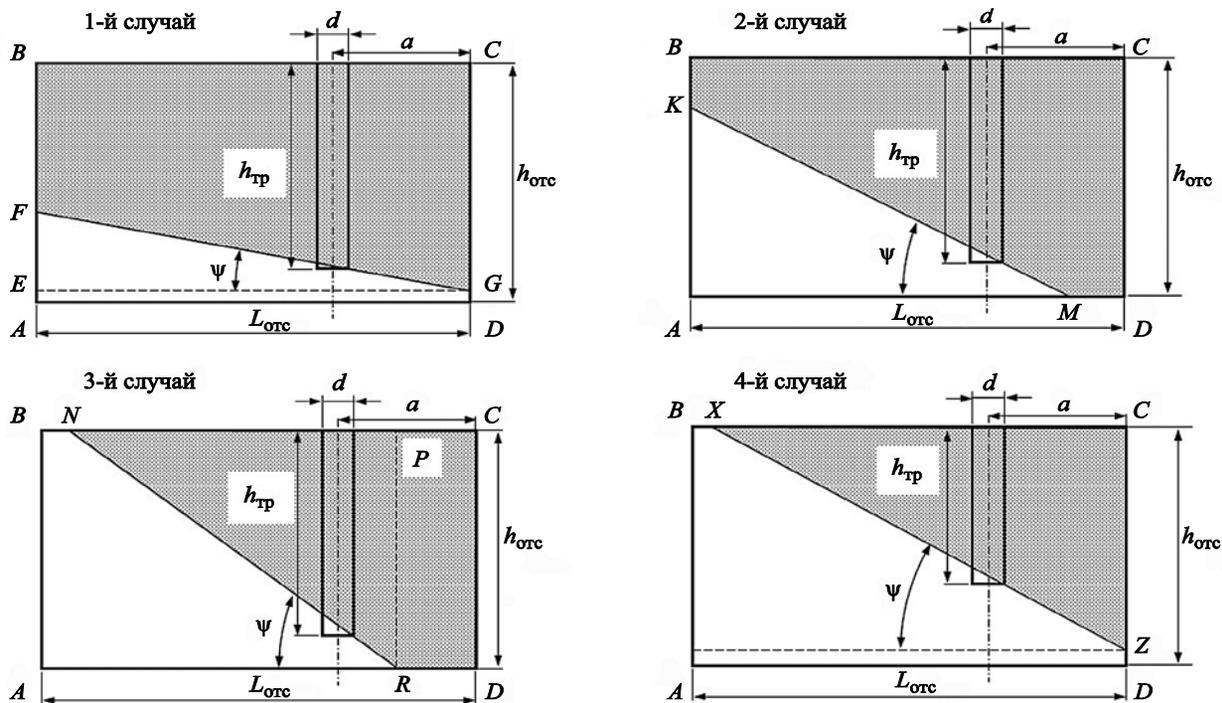
**Рис. 4.** Эскизы конструктивного исполнения отжимных труб: а) одинарная; б) двояная  
**Fig. 4.** Sketches of purging pipe designs: a) single; b) twin.

По результатам расчетов построены графики зависимости дифферента при всплытии от места расположения отжимных труб по длине отсеков (рис. 7).

Дополнительно выполнен расчет дифферента при всплытии одной оконечностью и второй оконечности плавучего дока для 12 расчетных случаев (табл. 4–6), отличающихся условной величиной  $\Delta a$ , которая характеризует смещение отжимных труб к оконечностям плавучего дока (рис. 8). При  $\Delta a = 0$  ось отжимной трубы располагается посередине балластного отсека плавучего дока.

Прямой порядок предполагает продувку балластных отсеков последовательно, начиная с поднимаемой первой носовой оконечности. Измененный порядок продувки применяется только при подъеме второй оконечности и предполагает продувку в обратной последовательности, т.е. начиная от кормовой оконечности.

Расчеты для гипотетического затонувшего плавучего дока с малым количеством крупных балластных отсеков, наподобие ПД-50, показали, что смещение всех отжимных труб в сторону носовой, поднимаемой в первую очередь оконечности позволяет уменьшить дифферент более чем на 30%. Однако при этом потеря клиновидных объемов во всех отсеках становится настолько большой, что всплытия второй оконечности может не произойти (рис. 8).



**Рис. 5.** Формы продутого прямоугольного объема при применении отжимных труб для четырех возможных расчетных случаев

**Fig. 5.** Shapes of rectangular volume purged by the pipes for the four possible design scenarios

Наибольший эффект достигается при смещении отжимных труб в сторону ближе расположенных оконечностей при измененном порядке продувки (рис. 8). На основании выполненных расчетов предложен способ подъема затонувших объектов с малых и средних глубин с применением эффекта автостабилизации по дифференту, защищенный патентами Российской Федерации № 2720299 от 28.04.2020 и № 2779337 от 06.09.2022.

## Выводы

### Conclusions

- Подъем затонувших крупногабаритных объектов с малых и средних глубин (не превышающих 1/3 длины поднимаемого объекта) целесообразно выполнять целиком способом восстановления их собственной плавучести при наличии достаточного количества замкнутых объемов (балластных отсеков). Наиболее подходящими для этого являются затонувшие плавучие доки.
- Во время подъема способом восстановления собственной плавучести требуется ограничивать дифферент при всплытии. Это успешно достигается за счет применения эффекта автостабилизации по дифференту, расчет которого выполняется по методике, разработанной в рамках НИР «Гиперион-2022».

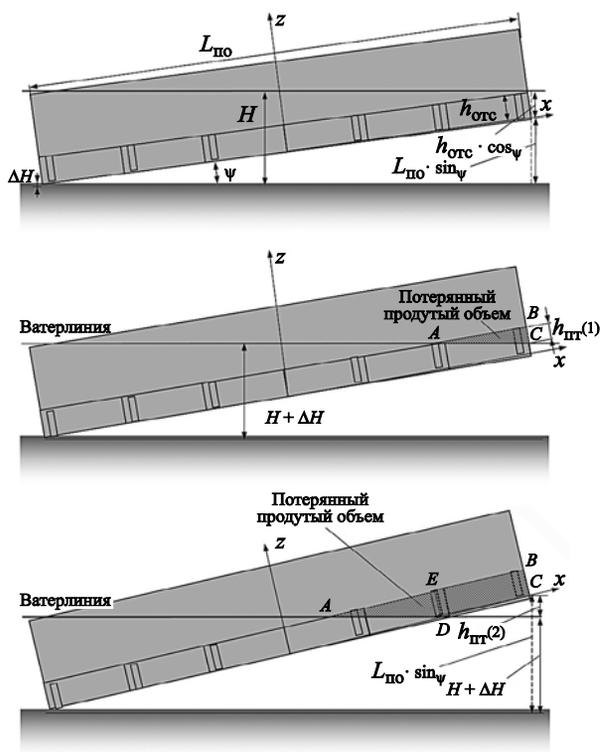


Рис. 6. Графическая схема подъема одной оконечности с указанием потерянного продутого объема и линейных характеристик

Fig. 6. Sketch of salvaging one hull end with indication of lost purged volume and linear characteristics

Таблица 1. Результаты расчетов при подъеме одной оконечностью

Table 1. Calculation results for salvaging one hull end

Расстояние до оси трубы, м	1,0	2,4	3,8	5,2	6,7	9,5	12,3	15,2	18,0
Дифферент, град.	7,48	8,81	10,68	12,92	14,09	15,07	15,72	16,12	16,38
Продутые группы балластных отсеков	БО-1, БО-2, БО-3, БО-4 – продукты полностью								

Таблица 2. Результаты расчетов при подъеме второй оконечности (прямой порядок продувки)

Table 2. Calculation results for salvaging the other hull end (direct order of purging)

Расстояние до оси трубы, м	1,0	2,4	3,8	5,2	6,7	9,5	12,3	15,2	18,0
Дифферент, град.	нет всплытия			14,59	15,14	15,91	16,62	17,1	17,41
Продутые группы балластных отсеков	БО-1, БО-2, БО-3, БО-4, БО-5 – продукты полностью; БО-6 – продукт частично								

Таблица 3. Результаты расчетов при подъеме второй оконечности (измененный порядок продувки)

Table 3. Calculation results for salvaging the other hull end (modified order of purging)

Расстояние до оси трубы, м	1,0	2,4	3,8	5,2	6,7	9,5	12,3	15,2	18,0
Дифферент, град.	нет всплытия			14,54	14,97	15,67	16,1	16,48	16,77
Продутые группы балластных отсеков	БО-1, БО-2, БО-3, БО-4, БО-6 – продукты полностью; БО-5 – продукт частично								

**Таблица 4.** Результаты расчетов при подъеме одной оконечностью**Table 4.** Calculation results for salvaging one hull end

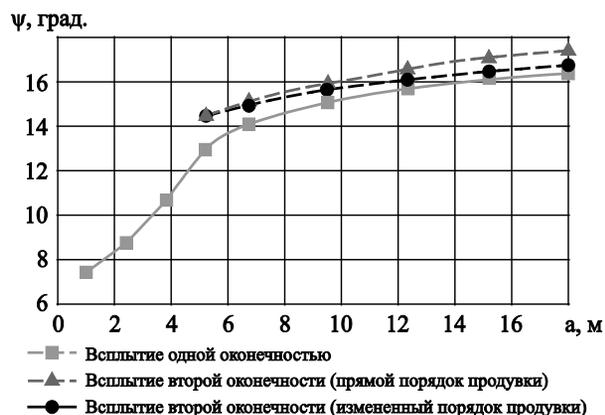
Условная величина смещения отжимных труб, м	0	5,6	11,4	17,0
Дифферент, град.	15,07	14,44	12,66	9,19
Продутые группы балластных отсеков	БО-1, БО-2, БО-3, БО-4 – продуты полностью			

**Таблица 5.** Результаты расчетов при подъеме второй оконечности (прямой порядок продувки)**Table 5.** Calculation results for salvaging the other hull end (direct order of purging)

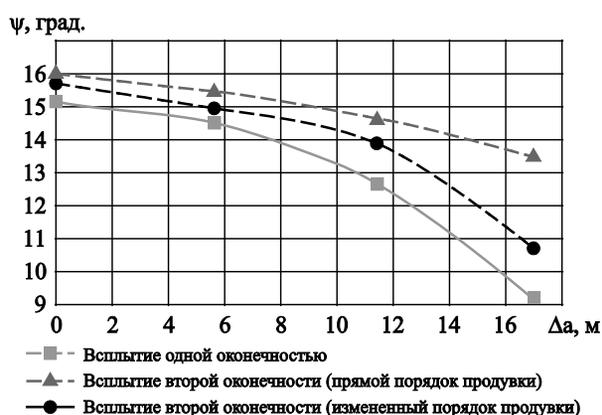
Условная величина смещения отжимных труб, м	0	5,6	11,4	17,0
Дифферент, град.	15,91	15,41	14,62	13,48
Продутые группы балластных отсеков	БО-1, БО-2, БО-3, БО-4, БО-5 – продуты полностью; БО-6 – продут частично			

**Таблица 6.** Результаты расчетов при подъеме второй оконечности (измененный порядок продувки)**Table 6.** Calculation results for salvaging the other hull end (modified order of purging)

Условная величина смещения отжимных труб, м	0	5,6	11,4	17,0
Дифферент, град.	15,67	14,91	13,85	10,72
Продутые группы балластных отсеков	БО-1, БО-2, БО-3, БО-4, БО-6 – продуты полностью; БО-5 – продут частично			

**Рис. 7.** Графики зависимости величины дифферента при всплытии затонувшего плавучего дока от места расположения отжимных труб**Fig. 7.** Salvage trim of the floating dock vs the arrangement of purging pipes

- Работоспособность методики проверена на контрольных примерах подъема существующих затонувших плавучих доков, в т.ч. гипотетического, характеристики которого позволяют продемонстрировать эффект автостабилизации по дифференту в наиболее полном объеме.
- Результаты расчетов показывают, что в наибольшей степени эффект автостабилизации по дифференту проявляется при смещении отжимных труб к ближе расположенным оконечностям и при измененном порядке продувки.

**Рис. 8.** Графики зависимости величины дифферента от смещения отжимных труб к оконечностям плавучего дока**Fig. 8.** Trim as function of purging pipe shifting towards the ends of the floating dock

## Список использованной литературы

1. Асминин В.В., Краморенко А.В., Фадеев Д.Е. Причины и следствия затопления плавдока ПД-50 и концепция его подъема // Материалы конференции молодых ученых и специалистов НИИ спасания и подводных технологий ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Вып. 3. Ломоносов : НИИ СиПТ, 2019. С. 4–15.

2. Технический проект подъема плавучего дока ПД-64 (по частям) : ВР.1392.00. Санкт-Петербург : НИИ СиПТ, 2020. 116 с.
3. Технический проект подъема плавучего дока ПД-64 : ВР.1384.00. Санкт-Петербург : НИИ СиПТ, 2015. 176 с.
4. Технический проект подъема плавучего дока ПД-16 : ВР.1391.00. Санкт-Петербург : НИИ СиПТ, 2020. 218 с.
5. Научно-технический отчет о НИР «Исследования направлений развития технических средств и автоматизации расчетных методик по судоподъему» (шифр «Гиперион-2022») / рук. Воронин К.П.; ответственный исполн.: Фадеев Д.Е. – СПб. – Ломоносов: НИИ спасания и подводных технологий ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 2022. – 149 с.
6. *Краморенко А.В.* Подъем затонувших объектов методом автостабилизации пространственного перемещения. Санкт-Петербург : 40 ГНИИ МО РФ, 1998. 131 с.
3. Salvage of floating dock PD-64. Technical Design. ВР 1384.00. St. Petersburg, Research Institute of Rescue and Underwater Technologies, 2015, 176 pp. (*in Russian*).
4. Salvage of floating dock PD-16. Technical Design. ВР 1391.00. St. Petersburg, Research Institute of Rescue and Underwater Technologies, 2020, 218 pp. (*in Russian*).
5. Development prospects for hardware and automation of salvage calculation procedures. Report. Project name Giperion-2022, Research Institute of Rescue and Underwater Technologies, N.G. Kuznetsov Naval Academy, Lomonosov, 2022, 149 pp. (*in Russian*).
6. *A. Kramorenko.* Salvage of sunken objects by self-stabilization of their position in space. St. Petersburg., 40th Head Research Institute of Russian MoD, 1998, 131 pp. (*in Russian*).

### Сведения об авторе

*Фадеев Дмитрий Евгеньевич*, научный сотрудник НИИ спасания и подводных технологий ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Адрес: 189412, Россия, Санкт-Петербург, г. Ломоносов, Морская ул., д. 4. E-mail: fadeev\_dm@mail.ru.

### About the author

*Dmitry E. Fadeev*, Researcher, Research Institute of Rescue and Underwater Technologies, N.G. Kuznetsov Naval Academy. Address: 4, Morskaya st., Lomonosov, St. Petersburg, Russia, post code 189412. E-mail: fadeev\_dm@mail.ru

### References

1. *A. Asminin, A. Kramorenko, D. Fadeev.* Causes and effects of sinking PD-50 floating dock and concept of its salvage // Materials of the Conference of young scientists and experts, Research Institute of Rescue and Underwater Technologies, N.G. Kuznetsov Naval Academy. Issue No. 3, Lomonosov, Research Institute of Rescue and Underwater Technologies, 2019, pp. 4-15 (*in Russian*).
2. Salvage of floating dock PD-64 (part by part). Technical Design. ВР 1392.00. St. Petersburg, Research Institute of Rescue and Underwater Technologies, 2020, 116 pp. (*in Russian*).

Поступила / Received: 13.07.23  
Принята в печать / Accepted: 01.08.23  
© Фадеев Д.Е., 2023