

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

Факультет информатики, математики и компьютерных наук

**Программа подготовки бакалавров по направлению
01.03.02 Прикладная математика и информатика**

Шустров Дмитрий Михайлович

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Исследование возможностей системы автоматического демпфирования для
снижения параметров вертикальной качки судна на воздушной подушке

Рецензент

д.ф.-м.н., проф.

В. А. Калягин

Научный руководитель

к.т.н., ст. преп.

Ф. С. Пеплин

Нижний Новгород, 2024

Содержание

Введение	3
1 Построение математической модели СВП	5
1.1 Расходно напорная характеристика	5
1.1.1 Аппроксимация реальных данных	5
1.2 Уравнение воздушной подушки	8
1.3 Динамика СВП	9
1.4 Волновой процесс	10
1.4.1 Регулярная волна	10
1.5 Удары волн о корпус СВП	11
1.5.1 Влияние на объем ВП и площадь зазора	12
2 Интегрирование уравнений динамики	14
2.1 Моделирование	14
2.1.1 Метод Эйлера	15
2.1.2 Общие детали моделирования	15
2.2 Вычислительные эксперименты	18
Заключение	21
Список литературы	22

Введение

Обзор по теме исследования и актуальность

Суда, работающие на воздушной подушке, поддерживаются над поверхностью (водой, грунтом или льдом) за счет избыточного давления воздуха, который непрерывно поступает под днище воздушной подушки. Эти новаторские транспортные средства обладают рядом преимуществ перед традиционными кораблями и лодками, что делает их все более популярными в наше время. В частности, суда на воздушной подушке способны развивать гораздо большую скорость, чем обычные корабли, что позволяет значительно сократить время путешествия и повысить эффективность транспортировки грузов и пассажиров. Кроме того, они обладают отличной маневренностью и способностью преодолевать препятствия, такие как льды или водоросли, что делает их идеальным выбором для использования в условиях суровых климатических условий.

Однако, главной проблемой СВП на данный момент являются вертикальные колебания во время движения[7]. Текущее состояние исследований вертикальных колебаний СВП зависит от класса судна. Для СВП с классическим юбобным ограждением получен аналитический критерий устойчивости [8], согласно которому колебания можно уменьшить увеличивая расход вентиряторов в подушку, одновременно с этим уменьшая длину судна и давление в ВП. Однако данное условие не учитывает собственную динамику гибкого ограждения, которое может быть обчислено с помощью серии самостоятельных CFD расчетов. Судно другого типа было изучено в работе[3]. В [10] показано, что для уменьшения низкочастотных колебаний СВП необходимо увеличение давления в гибком ограждении ВП, что ведет к увеличению расхода воздуха, но внедрение такого метода решения сильно снижает мореходные качества судна.

Скеговые СВП используют жесткие скеги в качестве бокового ограждения зоны воздушной подушки, поэтому автоколебания не могут возникнуть для таких судов. Тем не менее СВПС могут испытывать колебания, известные как *движение по булыжной мостовой*. Данное явление представляет собой вертикальные колебания, вызванные резонансными эффектами в воздушной подушке. Они обычно возникают при небольшом волнении[6].

Значительная часть современных работ, посвященных исследованию дина-

мики СВП использует численные методы для точного интегрирования систем дифференциальных уравнений. Обсчет взаимодействия ВП и гибкого ограждения методом RANS был проведен в работе [4]. Также применялись методы ALE[2] и SPH[9].

Постановка задачи

Целью настоящей работы является проработка возможности снижения вертикальных колебаний судна на воздушной подушке посредством изменения демпфирующих свойств зоны повышенного давления. В соответствии с поставленной целью выбран ряд задач:

1. Построение математической модели судна на воздушной подушке скегового типа с учетом демпфирования, обусловленного вертикальным движением судна
2. Аprobация модели на примере конкретного судна
3. Проведение вычислительных экспериментов с целью выявления влияния коэффициента демпфирования ВП на характеристики вертикальной качки судна

1 Построение математической модели СВП

1.1 Расходно напорная характеристика

Явление *движения по булыженной мостовой* (англ. *cobblestone effect*) для судна на воздушной подушке было исследовано аналитически в монографии О. М. Фальтинсена [5]. Перепишем уравнение (5.33) из [5] в предположении отсутствия волнения:

$$A\ddot{H} + B \left(\frac{1}{2}Q_0 - \frac{\partial Q}{\partial p} \Big|_0 p_0 \right) \dot{H} + CH = 0, \quad (1.1)$$

где A, B, C - положительные константы. Уравнение вертикального движения (1.1) является следствием из закона сохранения энергии. Устойчивость движения определяется тем, что все действительные части корней характеристического уравнения отрицательны. В контексте уравнения (1.1) это условие можно выразить следующим образом:

$$\frac{1}{2}Q_0 - \frac{\partial Q}{\partial p} \Big|_0 p_0 > 0, \text{ где } (Q_0, p_0) \text{ точка на нисходящей ветви РНХ} \quad (1.2)$$

Расходно-напорная характеристика (Рис. 1) используется для описания системы вентиляторов, которые нужны для создания области повышенного давления под судном. Данная кривая ограничивается уравнением (1.2). Можно спроектировать систему вентиляторов таким образом, что положение равновесия всегда будет находиться на убывающей ветви расходно-напорной характеристики, поэтому можно получить отрицательную производную $\frac{\partial Q}{\partial p} \Big|_0$, что является необходимым условием устойчивости (1.2). Эта производная будет положительной только для очень маленьких напоров нагнетателя, которые не могут появиться рядом с положением равновесия. Поэтому нет нужды рассматривать эффект *движения по булыженной мостовой* на тихой воде, а только при наличии волнения.

1.1.1 Аппроксимация реальных данных

В настоящей работе предлагается рассмотреть судно на воздушной подушке с параметрами перечисленными в Таблице 1. Данные были получены из техни-

ческой документации к центробежному нагнетателю СВП.

$p, \text{Па}$	2809	2965	2902	2715	2497	2325	2060	1280	593
$Q, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	0	6	11	17	22	25	28	34	38

Таблица 1: Исходные параметры центробежного нагнетателя, округленные до целой части.

Так как теоретическая составляющая предполагает существование непрерывной дифференцируемой функции расходно-напорной характеристики, предлагается аппроксимировать с помощью метода наименьших квадратов данные из Таблицы 1. В результате аппроксимации получена функция:

$$f(q) = p(Q_{in}) = -2.756q^2 + 48.46q + 277 \quad (1.3)$$

Данные из Таблицы 1 и функция $f(q)$ представлены на Рис. 2. Используя полученную аппроксимацию $p(Q_{in})$ получим обратную функцию $Q_{in}(p)$, решив уравнение $f(q) = p$ и выбрав решения только на нисходящей ветви квадратич-

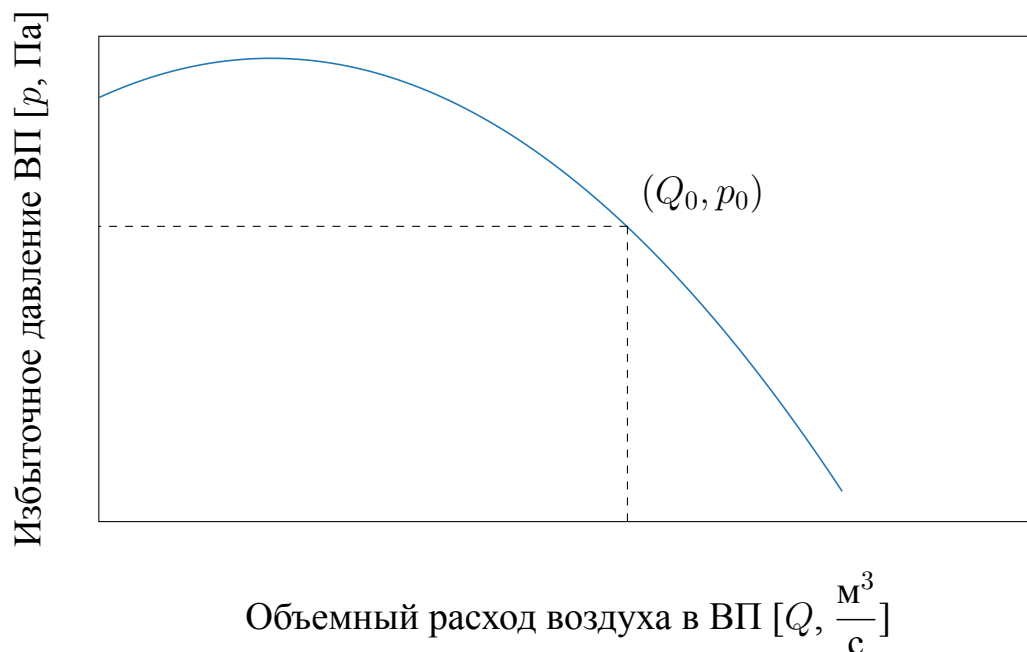


Рис. 1: Расходно-напорная характеристика. Точка (Q_0, p_0) - состояние, при котором достигается устойчивость движения СВП (1.2)

ной функции (1.2):

$$Q_{in}(p) = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4A(C - p)}}{2A}, \text{ где } A, B, C \text{ из } f(q) \quad (1.4)$$

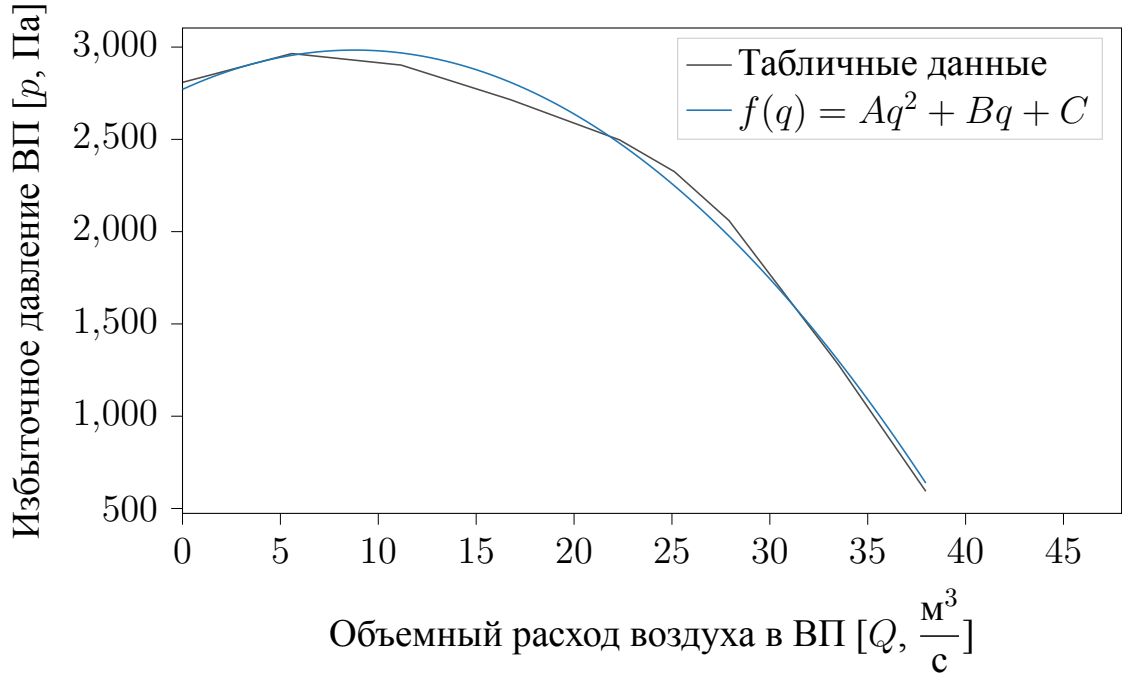


Рис. 2: Расходно напорная характеристика $p(Q_{in})$. Аппроксимация МНК квадратичной функцией $f(q) = -2.756q^2 + 48.46q + 2771$.

Объемный расход воздуха Q_{out} , вытекающего из зоны ВП, может быть вычислен следующим образом:

$$Q_{out} = Q_{out}(p, S_{gap}) = \chi \sqrt{\frac{2p}{\rho_a}} S_{gap} \quad (1.5)$$

Объемный расход воздуха Q_{in} , нагнетаемого вентиляторами в зону ВП, вычисляется с помощью РНХ вентилятора:

$$Q_{in} = Q_{in}(p) \quad (1.6)$$

Теперь уравнения (1.5) и (1.6) можно использовать в вычислениях динамики СВП. Также можно заметить, что точка пересечения этих функций при конкретных значениях S_{gap} показывает существование состояния равновесия (Рис. 3).

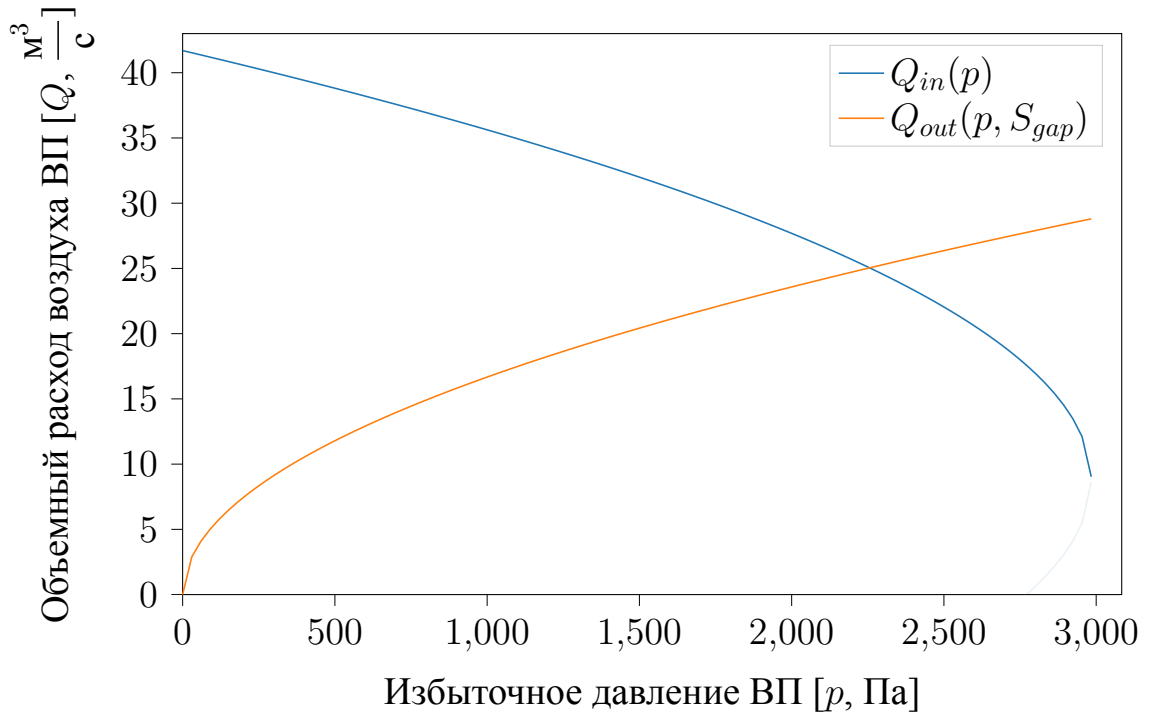


Рис. 3: Расходно напорная характеристика $Q_{in}(p)$ и истечение $Q_{out}(p, S_{gap})$ при высоте зазора в 1 см.

1.2 Уравнение воздушной подушки

Избыточное давление в воздушной подушке p представляется в виде двух слагаемых:

$$p = p_{qs} + p_{damp} \quad (1.7)$$

где p_{qs} - стационарная составляющая давления, зависящая только от текущего положения судна, а p_{damp} - демпфирующее давление ВП, отвечающее за влияние вертикальной скорости судна \dot{H} .

Изменение стационарной части давления можно связать с законом изменения массы воздуха в зоне ВП [1, раздел 2.1]:

$$\frac{dp_{qs}}{dt} = \frac{np_a}{W} \left(Q_{in} - Q_{out} - \frac{dW}{dt} \right) \quad (1.8)$$

где n - коэффициент политропы, а W - объем воздушной подушки. Члены Q_{in} и Q_{out} в данном случае зависят от p_{qs} и вычисляются по уравнениям (1.5) и (1.6).

Демпфирующее давление p_{damp} вычисляется следующим образом:

$$p_{damp} = D(S_{gap})\rho \left(-\frac{Q_{in}}{S}\dot{H} + \frac{1}{2}\dot{H}^2 \right) S \quad (1.9)$$

где член $D(S_{gap})$ зависит только от зазора под гибким ограждением воздушной подушки.

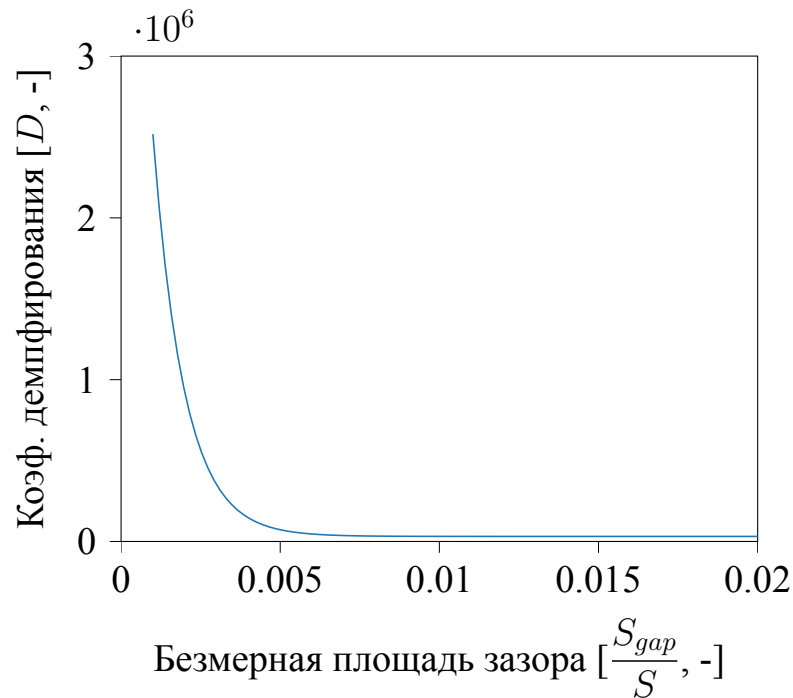


Рис. 4: Кривая коэффициента демпфирования в виде экспоненциальной функции $f(x) = A + Be^{Cx}$, где $A = 31253.5531$, $B = 6930673.3521$ и $C = 1025.1779$

Для различных площадей зазора значения коэффициента $D(S_{gap})$ определяются путем выполнения ряда независимых расчетов методом CFD. График функции $D(S_{gap})$, применяемой в данном исследовании, представлен на рис. 4.

1.3 Динамика СВП

В настоящей работе предполагается, что корпус судна является абсолютно жестким, следовательно, его динамику можно описать несколькими уравнениями для поступательных и вращательных движений по каждой координате. Однако, на данном этапе исследования нас интересует только вертикальное движение и тангаж, поэтому большую часть уравнений можно исключить без потери общности. Также, при анализе устойчивости СВП будет использоваться упрощенное представление судна - гибкие ограждения воздушной подушки представлены как недеформируемый стержень, жестко прикрепленный к корпусу судна, чтобы исключить сложные и трудоемкие вычисления динамики и демпфирования гибкого ограждения. Такая модель называется эквивалентным

стержнем и вводится для более простого описания момента вращения судна. С учетом всего вышесказанного для описания динамики СВП можно выписать второй закон Ньютона и момент вращения судна:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 H}{dt^2} &= \mathbf{F}_{AC} + \mathbf{F}_{Wave} = \mathbf{F} \\ I_z \frac{d^2 \varphi}{dt^2} &= \mathbf{M}_{AC} + \mathbf{M}_{Wave} = \mathbf{M} \end{aligned} \quad (1.10)$$

Индекс AC в (1.10) означает, что сила или момен действуют на корпус судна со стороны воздушной подушки, а $Wave$ от контакта корпуса судна с волной. Слагаемые в разложении силы и момента вычисляются путем интегрирования уравнений по времени на каждом шаге моделирования по аналитическим закономерностям, описанным далее.

1.4 Волновой процесс

В разделе 1.1 было описано, что нет необходимости рассматривать динамику и свойства устойчивости СВП на стоячей воде, поэтому предлагается ввести в моделирование волновой процесс $\Psi(x, t)$. В настоящей работе будет рассматриваться *регулярное волнение* - волнение, при котором форма профиля всех волн одинакова и схожа с синусоидой.

1.4.1 Регулярная волна

Волновой процесс $\Psi(x, t)$ можно характеризовать синусоидой (или косинусоидой) с длиной волны λ :

$$\Psi(x, t) = A \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} + 2\pi \nu t + \varphi_0\right) = A \cos(kx + \omega t + \varphi_0) \quad (1.11)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновой вектор, а $\omega = kc$ - циклическая частота. Волна бежит влево. Скорость волны c вычисляется следующим способом:

$$c = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi} g} = \sqrt{\frac{g}{k}} \quad (1.12)$$

Таким образом, зная время прошедшее с начала моделирования можно вычис-

лять высоту волны в различных позициях и разные моменты времени:

$$\Psi(x_0, dt) \quad \Psi(x_0, 2 \cdot dt) \quad \dots \quad \Psi(x_0, n \cdot dt)$$

Далее в работе для удобства обозначения вместо $\Psi(x, t)$ будет использоваться обозначение y_{wave} (почти всегда рассматривается часть волны, находящаяся в конкретный момент времени под судном).

1.5 Удары волн о корпус СВП

Для учета удар волн о корпус будем использовать *метод плоских поперечных сечений*. Для этого необходимо разбить корпус на N сечений (чем больше N , тем точнее будут вычисления). Тогда расстояние между сечениями:

$$\Delta L = \frac{L}{N} \quad (1.13)$$

Для каждого сечения необходимо вычислить положение свободной поверхности y . На данном этапе $y = 0$. Если в каком то из сечений вода касается корпуса судна ($y_{ship} < y_{wave}$), то пятно контакта имеет площадь:

$$S_{wash}^i = S_{wash}^i(\Delta L) = \Delta L \cdot b \quad (1.14)$$

где i - номер сечения, а b - ширина судна. Тогда сила, действующая на пятно контакта определяется как:

$$F_{contact}^i = \theta \cdot \rho_w \frac{V_i^2}{2} S_{wash}^i \quad (1.15)$$

где V_i - скорость i -го сечения, т.е. $V_i = |\mathbf{V} + \mathbf{w} \times \mathbf{r}_i|$, где \mathbf{w} - вектор угловой скорости судна, \mathbf{r}_i - вектор, соединяющий центр тяжести судна с i -м сечением. Тогда $V_i = \sqrt{V_x^2 + (V_y + w_z \cdot x_i)^2}$, где x_i - координата i -того сечения в системе координат, связанной с судном (начало этой системы координат в центре тяжести судна, ось x направлена к носу, z к правому борту, y вверх). θ - гиперпараметр, отвечающий за пропорциональное увеличение силы удара волны.

Таким образом получим выражение для полной силы, которую вызывает

удар волны:

$$F_{wave} = \sum_{i=1}^N F_{contact}^i \quad (1.16)$$

Также необходимо вычислить момент вращения судна под влиянием удара волны о корпус:

$$M_{contact} = \sum_{i=1}^N F_{contact}^i \cdot x_i \quad (1.17)$$

где x_i из уравнения (1.15).

1.5.1 Влияние на объем ВП и площадь зазора

Объем воздушной подушки W и площадь зазора S_{gap} определяются исходя из *гипотезы плоских поперечных сечений*, как и замкнутая часть корпуса. Принимая уровень волны в каждом сечении за y_{wave} , а высоту жесткого корпуса судна за y_{ship} , получим расстояние от корпуса судна до волны:

$$d_i = y_{ship} - y_{wave} \quad (1.18)$$

Тогда объем в сечении равен:

$$W^i = \begin{cases} d_i \cdot \Delta L \cdot b & d_i > 0 \\ 0 & d_i \leq 0 \end{cases} \quad (1.19)$$

Суммарный объем ВП определяется как:

$$W = \sum_{i=1}^N W^i \quad (1.20)$$

Площадь зазора S_{gap} опреляется аналогичным образом, но нужно рассмотреть один крайний случай - сегменты с индексами $i = 1$ и $i = N$, так как они при-
бавляют к результату зазор носовой и кормовой ширины судна:

$$S_{gap}^i = \begin{cases} \begin{cases} (2 \cdot \Delta L + b) \cdot (d_i - d_{max}) & i = 1, N \\ (2 \cdot \Delta L) \cdot (d_i - d_{max}) & i = 2, \dots, N - 1 \end{cases} & d_i > d_{max} \\ 0 & d_i \leq d_{max} \end{cases} \quad (1.21)$$

Суммарная высота зазора:

$$S_{gap} = \sum_{i=1}^N S_{gap}^i \quad (1.22)$$

Формула для вычисления объема воздуха в сечении воздушной подушки (1.20) будет использоваться для определения необходимого объема воздуха, который необходимо нагнать под днище судна для поддержания его над поверхностью. Этот объем воздуха напрямую влияет на подъемную силу судна и его способность двигаться над водой или другой поверхностью. Путем вычисления объема воздуха в сечении воздушной подушки можно оптимизировать работу системы воздушной подушки и обеспечить эффективное движение судна. Также формула (1.22) нужна для корректной регулировки избыточного давления воздушной подушки под действием волнового процесса.

2 Интегрирование уравнений динамики

2.1 Моделирование

Как уже было сказано ранее, описание динамики судна на воздушной подушке сводится в упрощенном случае сводится к двум уравнениям - второму закону Ньютона для сил действующих на судно и моменту вращения судна, как жесткого стержня (1.10). Динамика судна также должна учитывать текущее состояние воздушной подушки, которое в свою очередь зависит от параметров нагнетателя (Рис. 1) и формы волны под днищем судна. Поэтому будем использовать уравнения (1.10) и (1.8) для дальнейшего описания судна:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 H}{dt^2} &= \mathbf{F} \\ \frac{dp}{dt} &= \frac{np_a}{W} \left(Q_{in} - Q_{out} - \frac{dW}{dt} \right) \\ I_z \frac{d^2 \varphi}{dt^2} &= \mathbf{M} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Распишем \mathbf{F} и \mathbf{M} из системы (2.23) с учетом знаков:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= F_{AC} - F_{attr} + F_{damp} + F_{wave} = (p_{qs} + p_{damp})S - mg + F_{wave} \\ \mathbf{M} &= M_{AC} + M_{contact} = p_{qs}S \cdot l_{AC} + M_{contact} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Так как численные методы интегрирования предполагают наличие задачи Коши для дифференциальных уравнений первого порядка, необходимо преобразовать систему второго порядка (2.23) к системе второго порядка путем разложения каждого уравнения на два уравнения меньших порядков:

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{H}}{dt} &= \frac{(p_{qs} + p_{damp})S - mg + F_{wave}}{m} & \frac{dH}{dt} &= \dot{H} \\ \frac{dp}{dt} &= \frac{np_a}{W} \left(Q_{in} - Q_{out} - \frac{dW}{dt} \right) & \frac{d\varphi}{dt} &= \dot{\varphi} \\ \frac{d\dot{\varphi}}{dt} &= \frac{p_{qs}S \cdot l_{AC} + M_{contact}}{I_z} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Таким образом, систему дифференциальных уравнений (2.25) можно интегрировать с помощью распространенных численных методов.

2.1.1 Метод Эйлера

В качестве простейшего как с точки зрения идеи, так и с точки зрения практической реализации в программном коде, будем использовать явный метод Эйлера.

Пусть дана задача Коши для уравнения первого порядка:

$$\begin{aligned}\frac{dy}{dx} &= f(x, y) \\ y|_{x=x_0} &= y_0\end{aligned}\tag{2.26}$$

Функция $f : \mathcal{R}^2 \rightarrow \mathcal{R}$. Решение такой задачи ищется на полуинтервале $(x_0, b]$. На промежутке вводятся точки $x_0 < x_1 < \dots < x_N \leq b$ чаще всего расстояние между которыми одинаково. Тогда приближенное значение y_i в узлах x_i , находится следующим образом:

$$y_i = y_{i-1} + (x_i - x_{i-1}) \cdot f(x_{i-1}, y_{i-1}), \forall i = 1, \dots, N\tag{2.27}$$

Очевидно, что при такой интерпретации метода интегрирования, чем больше параметр N , тем более точным будет являться полученный результат. Также стоит отметить, что явный метод Эйлера сильно зависим от ошибок округления и может быть численно неустойчивым. Метод Эйлера имеет множество более сильных аналогов и модификаций: *обратный, неявный, полуявный* методы Эйлера и семейство методов *Рунге-Кутты* разных порядков точности. Но в настоящей работе будет использоваться обыкновенный явный метод Эйлера в целях уменьшения количества операций с плавающей точкой на единицу времени и достижения большей производительности вычислений.

2.1.2 Общие детали моделирования

В данном разделе будут приведены все примененные допущения реализации, которые помогли получить необходимый результат (Значения используемых параметров приведены в таблице 2).

Для простоты проведения испытаний предполагается, что судно идет под действием буксира с постоянной скоростью. Также, в стартовой точке судно находится на поддутой воздушной подушке, и выходит в режимное состояние лишь спустя некоторое время после начала моделирования.

Нужно отметить, что хоть в математической модели динамики СВП и присутствует параметр сдвига центра тяжести, в данной работе он не применяется, так как в реальных судах обычно присутствует большой вентилятор, установленный в корме судна, который создает обратный момент, который будет закручивать судно вперед. Для решения этой проблемы изменяют положение центра тяжести, в целях уменьшения плеча закручивающей силы.

В настоящей работе также вводятся *сдерживающие* ограничения, которые на реальном судне обеспечиваются геометрией ограждений и физическими свойствами центробежного нагнетателя - ограничение на максимальное и минимальное избыточное давление воздушной подушки, а также ограничение на максимальный и минимальный тангаж судна.

Численное интегрирование производилось сначала с шагом $dt = 10^{-4}$, но как показали результаты экспериментов, это недостаточно, поскольку в силу программной реализации, одни физические процессы начинают протекать моментально, в то время как другие только начинают накапливать энергию и ускорение за счет дифференциальных уравнений (пример моментального процесса - изменение нагнетаемого вентилятором воздуха, изменение вертикальной координаты - интегрируемый процесс). Для решения этой проблемы был выбран более мелкий шаг $dt = 10^{-7}$. С таким шагом моментальные изменения параметров нагнетателя перестают быть моментальными в рамках моделирования и становятся более отзывчивыми, так как за минимальным изменением интегрируемой величины следует такое же минимальное изменение нагоняемого в ВП объема воздуха.

Замер состояния системы происходил каждую секунду моделирования (один раз за 10^7 итераций). В момент проведения замера сохранялись важные для проведения исследования физические величины, такие как: вертикальная скорость, тангаж, изменение вертикальной координаты, состояние ВП и прочие. Такой шаг записи был выбран по нескольким причинам. Во-первых, это позволяет обойтись без перегрузки дискового пространства, ведь расчеты требуют минимум 100 секунд моделирования, что с частым сохранением может занимать значительное количество дискового пространства. Также при маленьком интервале записи визуальная репрезентация результатов моделирования становится нечитаемой, так как достаточно большое количество точек начинает перекры-

вать друг друга.

Также для определения степени влияния коэффициента демпфирования на поведение и динамику судна на воздушной подушке во время моделирования введем целевую функцию - вертикальную перегрузку, определяемую как отношение вертикального ускорения СВП к ускорению свободного падения. Целью экспериментов станет уменьшение вертикальной перегрузки и уменьшение колебаний тангажа при различных длинах волны.

Таблица 2: Значения физических величин и параметров судна до первого шага моделирования

обозначение	величина	значение	СИ
L	длина ВП	15	м
b	ширина ВП	6	м
S	площадь ВП	$Lb = 90$	м^2
d_{max}	максимальный клиренс ВП	0.7	м
d	текущий клиренс ВП	0	м
W	объем ВП	$Sd = 0$	м^3
I_z	момент инерции	$2.5 \cdot 10^5$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$
d_{gap}	высота зазора	0.01	м
S_{gap}	площадь истечения	$ab \cdot d_{gap} = 0.42$	м^2
g	ускорение св. падения	9.8	$\text{м}/\text{с}^2$
n	показатель политропы	1.4	-
χ	коэффициент истечения	1	-
p_a	атмосферное давление	10^5	Па
ρ_a	плотность воздуха	1.269	$\text{кг}/\text{м}^3$
l_{AC}	сдвиг ц.т. судна	0	м
H	вертикальная коорд. ц.т. судна	0.7	м
φ	тангаж	0	рад
m	масса судна	$1.6 \cdot 10^4$	кг
p	избыточное давление ВП	0	Па

2.2 Вычислительные эксперименты

В данном разделе дипломной работы представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных с целью изучения влияния различных факторов на поведение судна в условиях волнения моря.

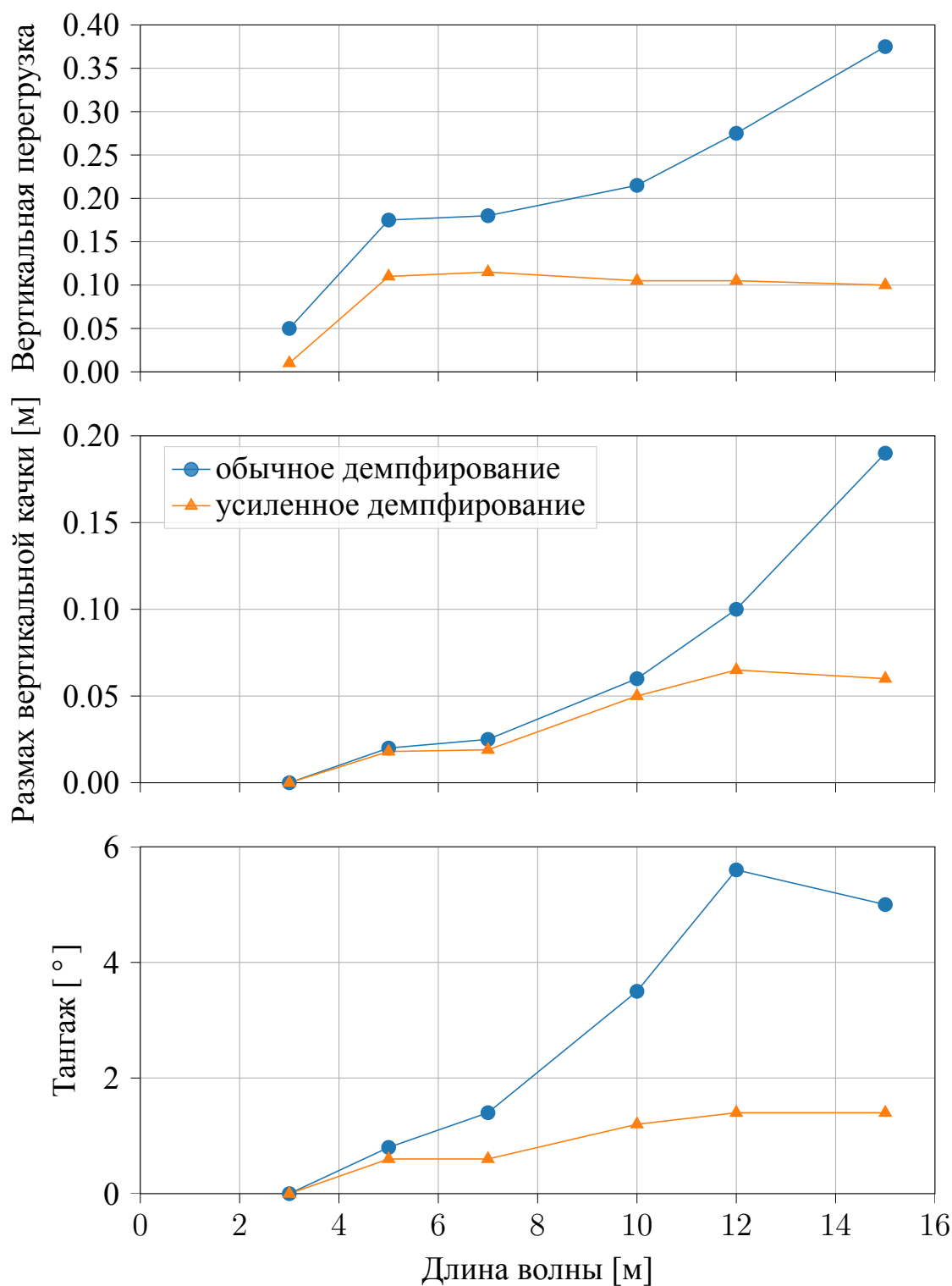


Рис. 5: Влияние увеличения коэффициента демпфирования на динамику судна на скорости 25 км/ч

В ходе экспериментов было проведено множество испытаний с длиной волны от 2 до 16 метров, что позволило нам получить обширный объем данных для последующего анализа.

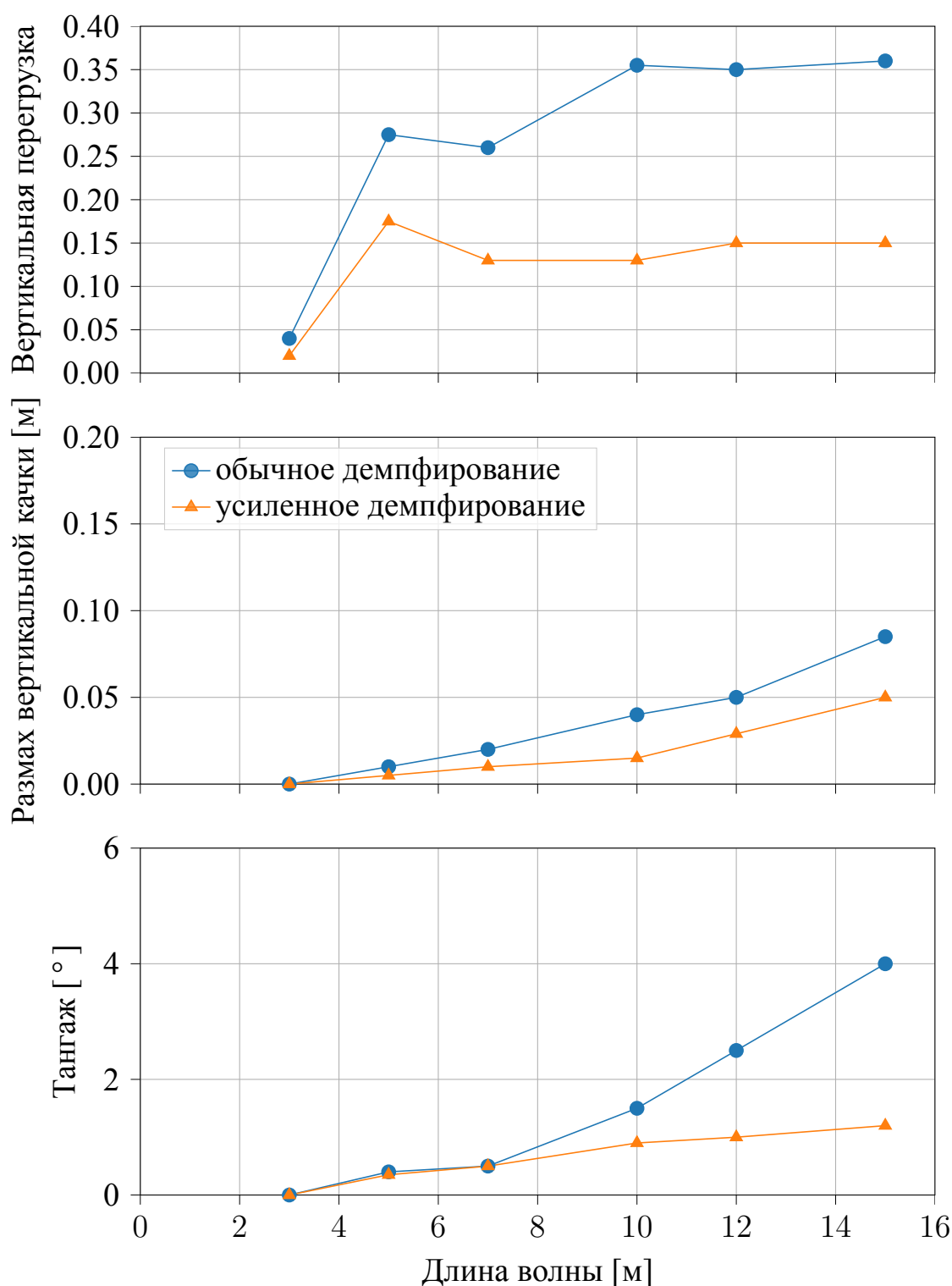


Рис. 6: Влияние увеличения коэффициента демпфирования на динамику судна на скорости 50 км/ч

Во время каждого эксперимента регистрировались три основных парамет-

ра: вертикальная качка, тангаж и вертикальный размах. Эти параметры являются ключевыми для понимания динамики судна в условиях волнения и позволяют оценить его устойчивость и управляемость.

Для более детального изучения влияния скорости судна на его поведение в условиях волнения было проведено две серии испытаний. В первой серии испытаний скорость судна была 25 км/ч, а во второй серии она увеличилась в два раза. Это позволило нам выявить зависимость между скоростью судна и его реакцией на волнение моря.

На графиках сравниваются две модели судна - первая реализует математическую модель, описанную в настоящей работе, вторая является аналогичной, но с увеличенным в 5 раз коэффициентом демпфирования (на практике без внедрения в конструктивные особенности судна такого добиться практически невозможно).

По результатам экспериментов можно сделать несколько важных выводов. Во-первых, видна зависимость демпфирующей силы от высоты зазора между гибким ограждением судна и водой (Рис. 6, график перегрузки) - чем больше длина волны при неизменной амплитуде, тем меньше будет высота зазора при прохождении данной волны. В экспериментах получилось полностью избежать данного эффекта путем увеличения коэффициента демпфирования. Также можно заметить, что увеличение демпфирующих сил поможет судну с исходными параметрами из Таблицы 2 улучшить большинство характеристик, связанных с устойчивостью, независимо как от длины волны, так и от скорости самого судна.

В целом, можно сказать что СВП имеет возможности автоматического демпфирования как минимум посредством корректирования коэффициента демпфирования в разных состояниях волнения и скорости судна. Способы варьирования коэффициента демпфирования не являются целью настоящей работы и являются задачей проектировщиков и CFD инженеров.

Заключение

В ходе исследования была проведен анализ литературы, на основе которого была разработана упрощенная математическая модель динамики судна на воздушной подушке. Эта модель была дополнительно усовершенствована и проинтегрирована неявным методом Эйлера по времени для проведения моделирования движения. Путем экспериментов были подобраны оптимальные гиперпараметры математической модели, что позволило улучшить точность моделирования и достоверно отразить реальные физические взаимодействия.

Далее с использованием полученной модели были проведены серии экспериментов с целью увеличения демпфирующих сил. Результаты этих экспериментов показали, что изменение демпфирующих сил влияет на динамику судна и его поведение на воздушной подушке. Можно утверждать, что СВП имеют возможности автоматического демпфирования для снижения параметров вертикальной качки.

Полученная модель представляет собой ценный инструмент для дальнейших исследований в области судостроения и подводного транспорта на воздушной подушке.

Исследования по данной теме можно продолжить, например разработав правило, которое будет регулировать коэффициент демпфирования *на ходу* в зависимости от накопленных измерений (как это делает ПИД регулятор). Также можно попробовать обучить модель машинного обучения для определения наиболее эффективного коэффициента демпфирования в зависимости от параметров окружающей системы.

Список литературы

1. Analytical and numerical investigation of the lift system stability of the air cushion vehicle fitted with closed inflated side seals / V. Shabarov [и др.] // *Applied Ocean Research*. — 2022. — Т. 120. — С. 103045.
2. *Challa R., Newborn D., Yim S.* Finite element contact/impact modeling capability of complex surface effect ship dynamics: preliminary assessment // *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Т. 55430. — American Society of Mechanical Engineers. 2013. — V009T12A044.
3. *Chung J., Sullivan P. A.* Linear heave dynamics of an air-cushion vehicle bag-and-finger skirt // *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*. — 2000. — Т. 43, № 140. — С. 39—45.
4. *Cole R. E.* Numerical Modeling of Air Cushion Vehicle Flexible Seals : дис. ... канд. / Cole Robert Edward. — Virginia Tech, 2018.
5. *Faltinsen O. M.* Hydrodynamics of high-speed marine vehicles. — Cambridge university press, 2005.
6. *Faltinsen O. M.* The effect of hydroelasticity on ship slamming // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. — 1997. — Т. 355, № 1724. — С. 575—591.
7. *Fein J., Magnuson A., Moran D.* Dynamic performance characteristics of an air cushion vehicle // *Journal of Hydronautics*. — 1975. — Т. 9, № 1. — С. 13—24.
8. *Mantle P. J.* A technical summary of air cushion craft development. — 1975.
9. *Ozbulut M., Yildiz M., Goren O.* A numerical investigation into the correction algorithms for SPH method in modeling violent free surface flows // *International Journal of Mechanical Sciences*. — 2014. — Т. 79. — С. 56—65.
10. *Демешко Г.* Проектирование судов. Амфибийные СВП // Учебник в. — 1992.