Теория корабля и строительная механика

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-5>
УДК 129.12

В.В. Шабаров, Ф.С. Пеплин

ШАБАРОВ ВАСИЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., доцент, e-mail: isadymacar@yandex.ru
ПЕПЛИН ФЕДОР СЕРГЕЕВИЧ – аспирант, e-mail: f-peplin@yandex.ru
Кафедра теоретической, компьютерной и экспериментальной механики
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Гагарина пр., 23, Нижний Новгород, 603950

Условия устойчивости несущего комплекса судна на воздушной подушке с гибкими скегами

Аннотация: На базе уравнения, описывающего изменение массы воздуха в воздушной подушке, и уравнения колебаний модели гибкого ограждения сформирована математическая модель несущего комплекса судна на воздушной подушке. Получено условие устойчивости системы «воздушная подушка–гибкое ограждение». Проанализировано влияние ряда факторов на устойчивость рассматриваемой системы. Установлено, что для судов на воздушной подушке с гибкими скегами тенденция к неустойчивому функционированию воздушной подушки растет с увеличением водоизмещения судна.

Ключевые слова: устойчивость судна, воздушная подушка, автоколебания судна, критерий Рауса–Гурвица.

Введение

В последнее десятилетие довольно интенсивно развивается строительство нового типа водного транспорта: судов на воздушной подушке (СВП), в том числе с гибким ограждением (ГО) баллонетного типа, или, по другой терминологии, СВП с гибкими скегами. Баллонет, или гибкий скег, представляет собой замкнутую пневматическую оболочку низкого (относительно атмосферного) избыточного давления или систему пневматических оболочек низкого давления, расположенных одна под другой и шарнирно скрепленных друг с другом, например через тканевые рояльные петли. В первом случае говорят об одноярусном баллонете, во втором – о многоярусном. К платформе баллонет крепится шарнирно, обычно через систему ликпаз–ликтрос.

СВП с гибкими скегами относятся к разновидности амфибийных судов, использующих аэростатическую разгрузку. Отметим, что амфибийные качества СВП с гибкими скегами ниже, чем у СВП с классическим ГО. Однако при прочих равных условиях СВП с гибкими скегами по сравнению с СВП с классическим ГО обладают более высокими характеристиками ходкости, мореходности, устойчивости на курсе, надежности функционирования ГО и, главное, повышенной безопасностью на ходовых режимах. До настоящего времени развитие СВП с гибкими скегами шло по линии пассажирских катеров и судов относительно малого (16...18 т) водоизмещения. Однако в последнее время интерес вызывают грузовые платформы на воздушной подушке с гибкими скегами водоизмещением 40...150 т.

В процессе испытаний ряда судов на воздушной подушке (как с жесткими, так и с гибкими скегами) на тихой воде и при небольшом волнении проявились ярко выраженные

автоколебания на крейсерских режимах движения. В зарубежной литературе такие колебания называются *cobblestone oscillations* – по аналогии с движением автомобиля по каменистой дороге. Амплитуды и частоты этих колебаний таковы, что их трудно выдержать экипажу и пассажирам. Механизм возникновения этих колебаний описан в работе [9].

Методология моделирования резонансных явлений во временной области в зоне воздушной подушки развита в статьях [11, 17]. В работе [9] представлен аналитический подход к оценке вертикальных колебаний СВП с жесткими скегами, основанный на ряде допущений. В указанных работах скеги считаются абсолютно жесткими. При исследовании автоколебательных явлений СВП с гибким ограждением в виде замкнутых пневмооболочек собственная динамика скегов, обусловленная их деформируемостью, обязательно должна быть принята во внимание.

Целью данной работы является формулировка и теоретическое обоснование условий устойчивости несущего комплекса судна на воздушной подушке с гибкими скегами.

Мы предполагаем провести анализ устойчивости несущего комплекса СВП с гибкими скегами, основываясь на решении характеристического уравнения линеаризованной системы уравнений динамики судна. Такой подход был ранее плодотворно применен при исследовании продольной устойчивости экраноплана. Так, с его помощью были получены критерии устойчивости экраноплана [2, 16], впоследствии примененные для исследования околоэкранный динамики летательных аппаратов [10, 12, 15]. Общая математическая модель движения судов с динамическими принципами поддержания построена в работе [6]. С помощью разработанной модели в [6] выведен критерий устойчивости быстроходных судов, являющийся обобщением критерия продольной устойчивости экраноплана. Важно отметить, что вопросы устойчивости судов с аэродинамической разгрузкой с единых позиций также рассматриваются в работе [13].

Для моделирования воздушной подушки в настоящей работе используется закон изменения массы воздуха в области повышенного давления. Данный закон записывается в форме дифференциального уравнения, связывающего скорость изменения давления, расход воздуха вентиляторов в область повышенного давления, истечение воздуха из ВП и объем воздуха в ВП. Такой подход к описанию эволюции давления в ВП часто применяется для моделирования динамики судов рассматриваемого класса, в частности в работах [7, 8, 14, 18].

Постановка задачи

Математическое моделирование устойчивости СВП в настоящей работе основано на следующих допущениях.

1. Процессы в системе «гибкое ограждение–воздушная подушка» проходят значительно быстрее изменения общекорабельных параметров.
2. Давление в воздушной подушке однородно и изменяется по адиабатическому закону.
3. Воздушная подушка состоит из одной секции.
4. Гибкое ограждение моделируется как абсолютно жесткий стержень длины l с шарнирным креплением к платформе (рис. 1), на который действуют момент сил от давления в воздушной подушке, момент сил сопротивления $M = M\left(\varphi, \frac{d\varphi}{dt}\right)$ и инерционный момент.

С учетом принятых допущений математическая модель функционирования несущего комплекса СВП с гибкими скегами может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = \frac{np_a}{W} \left(Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}} - \frac{1}{2} Ll^2 \frac{d\varphi}{dt} \right) \\ I_\varphi \frac{d^2\varphi}{dt^2} = pL \frac{l^2}{2} + M\left(\varphi, \frac{d\varphi}{dt}\right), \end{cases} \quad (1)$$

где p – избыточное давление в ВП, p_a – атмосферное давление ($p_a = 101350$ Па), n – показатель адиабаты для воздуха ($n = 1,4$), W – половина объема ВП, l – длина эквивалентного стержня, L – длина баллонета, приходящаяся на зону действия ВП, I_φ – момент инерции баллонета (стержня) относительно оси, проходящей через точку O , φ – угол отклонения стержня от

вертикали (рис. 1), $M\left(\varphi, \frac{d\varphi}{dt}\right)$ – момент сопротивления баллонета, зависящий при данной начальной закачке от избыточного давления в ВП, которое ведет к отклонению эквивалентного стержня на угол φ с угловой скоростью $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$.

Требуется исследовать устойчивость балансирующих режимов системы (1).

Рис. 1. Замена поперечного сечения баллонета эквивалентным, шарнирно закрепленным стержнем: а – одноярусный баллонет, б – двухъярусный баллонет.

Условие устойчивости гибкого ограждения $Im\lambda$

Линеаризуем систему (1) вблизи положения равновесия p_0 , Q_0 , φ_0 , определяемого из равенства нулю правых частей системы (1), т.е.

$$p = p_0 + \Delta p, \quad \Delta p \ll p_0,$$

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi, \quad \Delta\varphi \ll \varphi_0.$$

Пренебрегая членами порядка малости выше первого и учитывая условия положения равновесия, получаем

$$\begin{cases} \frac{d\Delta p}{dt} = \frac{np_a}{w} \left(\left(\frac{\partial Q_{вх}}{\partial p} - \frac{\partial Q_{вых}}{\partial p} \right)_0 \Delta p + \left(\frac{\partial Q_{вх}}{\partial \varphi} - \frac{\partial Q_{вых}}{\partial \varphi} \right)_0 \Delta\varphi - \frac{1}{2} L l^2 \Delta\dot{\varphi} \right) \\ I_\varphi \frac{d^2 \Delta\varphi}{dt^2} = \Delta p L \frac{l^2}{2} + \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} \right)_0 \Delta\varphi + \left(\frac{\partial M}{\partial \dot{\varphi}} \right)_0 \Delta\dot{\varphi}. \end{cases} \quad (2)$$

В (2) учтена независимость $Q_{вх}$ и $Q_{вых}$ от угловой скорости $\dot{\varphi}$. Кроме того, учитываем, что $\frac{\partial Q_{вх}}{\partial \varphi} = 0$. Для $Q_{вых}$ имеем

$$Q_{вых} = K_{ист} \sqrt{\frac{2p}{\rho}} L h_{зз} = K_{ист} \sqrt{\frac{2p}{\rho}} L (h_{зз0} + l(1 - \cos \varphi)), \quad (3)$$

где $h_{зз}$ – текущий зазор под стержнем, $h_{зз0}$ – зазор под эквивалентным стержнем при $\varphi = 0$.

$$\frac{\partial Q_{вых}}{\partial p} = K_{ист} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \frac{1}{2\sqrt{p}} L (h_{зз0} + l(1 - \cos \varphi)) = \frac{Q_{вых}}{2p}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q_{вых}}{\partial \varphi} = K_{ист} \sqrt{\frac{2p}{\rho}} L l \sin \varphi. \quad (5)$$

В результате (2) принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta p}{dt} = \frac{np_a}{w} \left(\left(\left(\frac{\partial Q}{\partial p} \right)_0 - \frac{Q_0}{2p_0} \right) \Delta p - K_{ист} \sqrt{\frac{2p_0}{\rho}} L l \sin \varphi_0 \Delta\varphi - \frac{1}{2} L l^2 \Delta\dot{\varphi} \right) \\ I_\varphi \frac{d^2 \Delta\varphi}{dt^2} = \Delta p L \frac{l^2}{2} + \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} \right)_0 \Delta\varphi + \left(\frac{\partial M}{\partial \dot{\varphi}} \right)_0 \Delta\dot{\varphi}. \end{cases} \quad (6)$$

Полагая

$$\Delta p = C_1 e^{\lambda t},$$

$$\Delta \varphi = C_2 e^{\lambda t},$$

имеем

$$\begin{cases} C_1 \lambda = \frac{np_a}{W} \left(\left(\left(\frac{\partial Q}{\partial p} \right)_0 - \frac{Q_0}{2p_0} \right) C_1 - K_{\text{ист}} \sqrt{\frac{2p_0}{\rho}} L l \sin \varphi_0 C_2 - \frac{1}{2} L l^2 C_2 \lambda \right) \\ I_\varphi C_2 \lambda^2 = C_1 L \frac{l^2}{2} + \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} \right)_0 C_2 + \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} \right)_0 C_2 \lambda. \end{cases} \quad (7)$$

Исключая из (7) C_1 , получаем

$$a_3 \lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0 = 0, \quad (8)$$

где

$$a_3 = I_\varphi,$$

$$a_2 = - \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} \right)_0 - I_\varphi \frac{np_a}{W} \left(\left(\frac{\partial Q}{\partial p} \right)_0 - \frac{Q_0}{2p_0} \right),$$

$$a_1 = \frac{np_a}{W} \left(\left(\frac{\partial Q}{\partial p} \right)_0 - \frac{Q_0}{2p_0} \right) \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} \right)_0 + \frac{np_a}{W} \left(\frac{L l^2}{2} \right)^2 - \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} \right)_0,$$

$$a_0 = \frac{np_a}{W} \left(\left(\frac{\partial Q}{\partial p} \right)_0 - \frac{Q_0}{2p_0} \right) \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} \right)_0 + K_{\text{ист}} \sqrt{\frac{2p_0}{\rho}} \frac{L^2 l^3}{2} \frac{np_a}{W} \sin \varphi_0.$$

В соответствии с критерием Рауса–Гурвица [1] действительные части корней уравнения (8) отрицательны тогда и только тогда, когда $a_3 > 0$ и все диагональные миноры матрицы Гурвица положительны.

Матрица Гурвица для уравнения (8) имеет вид:

$$\begin{pmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{pmatrix}.$$

Условия устойчивости могут быть сформулированы в следующем виде:

$$\begin{aligned} D &= \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_2 a_1 - a_3 a_0 = \\ &= - \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} \right)_0 \frac{np_a}{W} \left(\left(\frac{\partial Q}{\partial p} \right)_0 - \frac{Q_0}{2p_0} \right) + \left(\frac{L l^2}{2} \right)^2 + \frac{np_a}{W} \left(\left(\frac{\partial Q}{\partial p} \right)_0 - \frac{Q_0}{2p_0} \right)^2 I_\varphi \\ &+ \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} \right)_0 \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} \right)_0 - I_\varphi \left(\frac{L l^2}{2} \right)^2 \left(\frac{np_a}{W} \right)^2 \left(\left(\frac{\partial Q}{\partial p} \right)_0 - \frac{Q_0}{2p_0} \right) - \\ &- I_\varphi K_{\text{ист}} \sqrt{\frac{2p_0}{\rho}} \frac{L^2 l^3}{2} \frac{np_a}{W} \sin \varphi_0 > 0, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{vmatrix} a_1 & 0 \\ a_2 & a_0 \end{vmatrix} = a_1 a_0 > 0, \quad (10)$$

$$\begin{vmatrix} a_2 & 0 \\ 0 & a_0 \end{vmatrix} = a_2 a_0 > 0, \quad (11)$$

$$a_3 > 0. \quad (12)$$

Если в (9) положить $\left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} \right)_0 = 0$, $\varphi_0 = 0$, то будет получено условие устойчивого функционирования ВП с жесткими скегами:

$$\left(\left(\frac{\partial Q}{\partial p}\right)_0 - \frac{Q_0}{2p_0}\right) < 0. \quad (13)$$

Заметим, что этот результат также непосредственно следует из уравнения (5.33) работы [9].

Если в (9) считать $\left(\frac{\partial M}{\partial \phi}\right)_0 = 0$, то условие устойчивого функционирования несущего комплекса СВП с гибкими скегами будет иметь вид:

$$\frac{l}{2} \frac{n p_a}{W} \left(\left(\frac{\partial Q}{\partial p}\right)_0 - \frac{Q_0}{2p_0}\right) + K_{\text{ист}} \sqrt{\frac{2p_0}{\rho}} \sin(\phi_0) < 0. \quad (14)$$

При грамотном проектировании нагнетательного комплекса условие (13) на рабочих режимах выполняется. По физическому смыслу всегда $\left(\frac{\partial M}{\partial \phi}\right)_0 < 0$, $\left(\frac{\partial M}{\partial \phi}\right)_0 < 0$.

Таким образом, все коэффициенты характеристического уравнения (8) положительны, и с математической точки зрения устойчивость системы ВП–ГО определяется знаком определителя D . В случае если условие (13) не выполняется, неравенство (9) удовлетворяется автоматически, и устойчивость судна будет зависеть от знаков коэффициентов уравнения (8): устойчивое движение судна возможно, когда a_0, a_1, a_2 отрицательны, а коэффициент a_3 – положителен.

Численные результаты и их обсуждение

Ниже представлены результаты анализа устойчивости бортового гибкого ограждения применительно к двум проектам СВП, показанным на рис. 2.

а

б

**Рис. 2. СВП с гибкими скегами (с ГО баллонетного типа):
а – АСВП проекта А25, б – проект АСВП А750.**

Исходными данными в (8)–(14) являются массово-инерционные характеристики системы «ВП–ГО» I_ϕ, L, l, W , а также аэродинамические характеристики: зависимость расхода воздуха нагнетателей Q от давления p в воздушной подушке, величина коэффициента истечения воздуха из-под скега $K_{\text{ист}}$, величина коэффициента демпфирующего момента сопротивления скега $\frac{\partial M}{\partial \phi}$. С достаточной для практики проектирования точностью аэродинамические характеристики могут быть определены с помощью технологий вычислительной гидродинамики (CFD) [3–5].

Важную роль в решениях характеристического уравнения (8) и численных значениях определителя (9) играет зависимость момента сопротивления гибкого скега от угла его поворота $M(\phi)$. В настоящей работе рассматривается только двухъярусное ограждение баллонетного типа. Для расчета формы его поперечного сечения под действием как избыточного (по отношению к атмосферному) внутреннего давления в пневмооболочке $\Delta p_{\text{об}}$, так и избыточного внешнего давления Δp от ВП используется теория гибкой нерастяжимой невесомой нити.

Задача сводится к решению системы нелинейных уравнений, следующих из условий равновесия нити, постоянства массы закаченного в пневмооболочку воздуха, адиабатичности процесса, происходящего внутри объема воздуха в пневмооболочке, а также очевидных геометрических соображений непрерывности и гладкости кривой, ограничивающей поперечное сечение пневмооболочки. На рис. 3 представлены результаты расчетов формы гибких skeгов СВП проектов A25 (18 т) и A750 (145 т).

Рис. 3. Исходная и деформированная формы поперечного сечения баллонета:
а – проект A25; б – проект A750.

На рис. 4 представлены зависимости безразмерного момента сопротивления гибкого skeга от угла его поворота, определяемого, как это показано на рис. 1. Безразмерная величина погонного момента сопротивления гибкого skeга определяется как

$$\bar{M} = \frac{M}{p_0 W_0^{2/3}}.$$

Зависимости получены для различных начальных закачек воздуха в нижний ярус skeга, которые характеризуются начальными избыточными давлениями $p_{\text{ня}}^0$ в нижнем ярусе; величины этих начальных давлений указаны на рис. 4. Давление в верхних ярусах гибкого skeга составляло $p_{\text{вн}}^0 \approx 20000$ Па для проекта A25 и примерно 30000 Па для проекта A750.

Рис. 4. Зависимости погонного момента сопротивления гибкого skeга от угла его поворота при различных начальных избыточных давлениях $p_{\text{ня}}^0$ в нижнем ярусе гибкого skeга:
а – проект A25; б – проект A750.

Во всех расчетных случаях решениями характеристического уравнения (8) являлись один действительный отрицательный корень и пара комплексно сопряженных корней. Абсолютная величина действительного корня на порядок превосходит действительную часть

комплексно сопряженных корней: возмущенное движение, соответствующее действительному корню, затухает весьма быстро и не вызывает интереса при анализе устойчивости гибкого ограждения. Что касается пары комплексно сопряженных корней, то их действительная часть может быть как отрицательна (система «ВП–ГО» устойчива), так и положительна (система неустойчива).

В таблице для указанных проектов представлены результаты расчета устойчивости системы «ВП–ГО» при различных начальных закачках воздуха в нижние ярусы гибких скег. Отрицательные значения логарифмического декремента колебаний соответствуют неустойчивым режимам, положительные – устойчивым.

**Результаты расчета устойчивости системы «ВП–ГО» СВП
с гибкими скегами**

Проект	Начальное избыточное давление в нижнем ярусе $p_{ня}^0$, Па	Значение $\bar{D} = \frac{DQ_0}{p_0^2 W^3}$ (формула (9))	Безразмерные значения пары комплексно сопряженных корней, $\bar{\lambda} = \lambda \frac{W_0}{Q_0}$	Логарифмический декремент колебаний, $\chi = -\text{Re } \lambda \frac{2\pi}{\text{Im } \lambda}$	Период $T = \frac{2\pi}{\text{Im } \lambda}$, с
A25	346	-0,00692	$18,728 \pm 221i$	-0,532	0,126
	3796	-0,00369	$10,743 \pm 215i$	-0,314	0,130
	10376	0,000213	$-0,641 \pm 219i$	0,0184	0,128
	17730	0,018	$-5,035 \pm 229i$	0,138	0,122
A750	871	-0,00853	$17,093 \pm 201i$	-0,534	0,171
	8516	-0,00479	$10,444 \pm 193i$	-0,340	0,178
	32356	-0,00103	$1,905 \pm 214i$	-0,056	0,160

Как следует из представленных результатов, устойчивость системы ВП–ГО зависит от начальной закачки воздуха в гибкие скеги. Это вполне ожидаемый результат, имеющий, однако, некоторые нюансы.

Дело в том, что проект A750 примерно соответствует по числу Фруда проекту A25 с геометрическим масштабom $m = 2:1$. Анализ приведенной выше таблицы показывает, что проект A25 при давлении в нижнем ярусе $p_{A25} \approx 10000$ Па устойчив. При моделировании по числу Фруда давлению в нижнем ярусе гибкого скега для пр. A25 соответствует давление $p_{A750} \approx 20000$ Па более крупного судна проекта A750. Однако для пр. A750 увеличение начального избыточного давления даже до величины порядка 30000 Па не обеспечивает устойчивого функционирования системы «ВП–ГО». Таким образом, численные результаты показывают, что при равенстве чисел Фруда проектов характеристики устойчивости не моделируются.

Источником нарушения моделирования характеристик устойчивости является уравнение для давления в воздушной подушке:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{np_a}{W} \left(Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}} - \frac{1}{2} L l^2 \frac{d\varphi}{dt} \right).$$

Пусть p_0 , l_0 , T_0 – соответственно характерное давление, характерный геометрический размер и характерное время. Тогда $p = p_0 \bar{p}$, $t = T_0 \bar{t}$, $W = l_0^3 \bar{W}$, $Q_{\text{вх}} = \frac{l_0^3}{T_0} \bar{Q}_{\text{вх}}$, $Q_{\text{вых}} = \frac{l_0^3}{T_0} \bar{Q}_{\text{вых}}$, $L = l_0 \bar{L}$, $l = l_0 \bar{l}$.

Имеем

$$\frac{p_0}{T_0} \frac{d\bar{p}}{d\bar{t}} = \frac{np_a}{l_0^3 \bar{W}} \frac{l_0^3}{T_0} \left(\bar{Q}_{\text{вх}} - \bar{Q}_{\text{вых}} - \frac{1}{2} \bar{L} \bar{l}^2 \frac{d\varphi}{d\bar{t}} \right),$$

или

$$\frac{d\bar{p}}{d\bar{t}} = \frac{np_a}{p_0 \bar{W}} \left(\bar{Q}_{\text{вх}} - \bar{Q}_{\text{вых}} - \frac{1}{2} \bar{L} \bar{l}^2 \frac{d\varphi}{d\bar{t}} \right). \quad (15)$$

Если безразмерная величина в скобках правой части (15) для модели и натуры одинакова, то безразмерные скорости изменения давления в ВП различны. Безразмерная скорость изменения давления в ВП падает с ростом давления в ВП на балансировочном режиме.

Проектная величина избыточного давления в ВП увеличивается с ростом водоизмещения судна. Поэтому для СВП с гибкими скегами увеличение водоизмещения возможно лишь при условии опережающего роста избыточного давления в гибких скегах. Так, для СВП проекта А750 потребные для обеспечения устойчивости системы ВП–ГО давления оказываются порядка 40000 Па. Такие избыточные давления снижают амфибийные качества СВП и, кроме того, требуют разработки новых материалов гибких ограждений с повышенными разрывными характеристиками.

Условие (9) позволяет наметить другие варианты обеспечения устойчивости системы «ВП–ГО». Это резкое, в два и более раз, увеличение по абсолютной величине наклона характеристики $\left(\frac{\partial Q}{\partial p}\right)_0$ ($\left(\frac{\partial Q}{\partial p}\right)_0 < 0$) или же резкое, в пять и более раз, увеличение демпфирующего момента $\left(\frac{\partial M}{\partial \dot{\varphi}}\right)_0$ гибкого скега. Так, увеличение по абсолютной величине наклона $\left(\frac{\partial Q}{\partial p}\right)_0$ в два раза позволяет обеспечить устойчивость системы для пр. А25 даже при относительно низкой закачке $p_{\text{ня}}^0 = 3796$ Па нижнего яруса гибкого скега; устойчивость обеспечивается и при увеличении демпфирующего момента скега примерно в пять раз. Однако логарифмический декремент колебаний в первом случае равен $\lambda = 0,0142$, в то время как во втором – $\lambda = 0,202$.

Важно отметить, что и первый, и второй варианты конструктивно реальны, если их прорабатывать и разрабатывать на ранних стадиях создания СВП. Второй вариант представляется более предпочтительным, поскольку позволит не только обеспечить устойчивость системы ВП–ГО, но и снизить колебательность этой системы, которая, согласно представленным выше численным результатам, весьма высока.

Выводы

Итак, на базе уравнения, описывающего изменение массы воздуха в воздушной подушке, и уравнения колебаний гибкого ограждения нами сформирована математическая модель функционирования несущего комплекса СВП. Получено условие устойчивости системы «воздушная подушка–гибкое ограждение». Проанализировано влияние ряда конструктивных факторов на вертикальные автоколебания СВП.

Показано, что для СВП тенденция к неустойчивости системы «воздушная подушка–гибкое ограждение» растет с увеличением водоизмещения. Оперативное устранение имеющей место неустойчивости функционирования воздушной подушки на натурных СВП с гибкими скегами в определенных пределах возможно за счет повышения начального избыточного давления в гибких скегах. Для крупных СВП величины этих потребных давлений могут оказаться чрезмерными как в части негативного влияния на амфибийные качества СВП, так и в части возникающих проблем в обеспечении прочности ГО.

Дальнейшее исследование устойчивости несущего комплекса амфибийного судна на воздушной подушке планируется проводить путем учета влияния собственной динамики судна на устойчивость и уточнения модели гибкого ограждения.

Мы полагаем, что в целом анализ устойчивости системы «воздушная подушка–гибкое ограждение» должен проводиться на ранних стадиях проектирования с коррекцией на этих стадиях аэрогидродинамической компоновки СВП и схемы ГО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1967. 576 с.
2. Иродов Р.Д. Критерии продольной устойчивости экранопланов // Ученые записки ЦАГИ. 1970. № 1. С. 63–74.
3. Кальясов П.С., Любимов А.К. Математическое моделирование аэродинамики подъемного комплекса судна на воздушной подушке // Вестник Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2008. № 2. С. 122–127.
4. Кальясов П.С., Любимов А.К., Шабаров В.В., Якимов А.К. Развитие и применение методов вычислительного эксперимента для исследования несущего комплекса амфибийных судов на воздушной подушке // Вестник Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2009. № 6. С. 142–151.
5. Кальясов П.С., Туманин А.В., Шабаров В.В., Якимов А.К. Математическое моделирование несущего комплекса судов на воздушной подушке (СВП) // Морской вестник. 2011. № 1. С. 104–107.
6. Collu M., Patel M.H., Trarieux F. The longitudinal static stability of an aerodynamically alleviated marine vehicle, a mathematical model. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2009(466);2116:1055–1075.
7. Connell B.S.H., Milewski W.M., Goldman B. et al. Single and multi-body surface effect ship simulation for T-Craft design evaluation. Proceedings of 11th intern. conf. on fast sea transportation. Honolulu, 2011:26–29.
8. Eremeyev V.O., Peplin F.S., Tumanin A.V. Mathematical Model of the dynamics of an Air Cushion Vehicle with ballonnet type skirt on water. Procedia Engineering. 2017(206):354–359.
9. Faltinsen O.M. Hydrodynamics of high-speed marine vehicles. Cambridge Univ. Press, 2005.
10. Hao W., Teo C.J., Khoo B.C. et al. Aerodynamic and stability characteristics of NACA4412 in ground effects. Intern. J. of Intelligent Unmanned Systems. 2013(1);2:145–153.
11. Hirata N., Faltinsen O.M. Computation of Cobblestone effect with unsteady viscous flow under a stern seal bag of a SES. J. of Fluids and Structures. 2000(14);7:1053–1069.
12. Lee J. Computational analysis of static height stability and aerodynamics of vehicles with a fuselage, wing and tail in ground effect. Ocean Engineering. 2018(168):12–22.
13. Matveev K., Kornev N. Dynamics and stability of boats with aerodynamic support. J. of Ship Production and Design. 2013(29);1:17–24.
14. Peplin F., Shabarov V., Tumanin A. Determination of loads acting on the ballonnet type board seal of amphibious hovercrafts. FAST 2017 Conference Proceedings. Nantes, 2017, p. 387–394.
15. Shin S.Y., Whang K.H., Kim K.S. et al. Evaluation of Longitudinal Stability Characteristics Based on Irodov's Criteria for Wing-In-Ground Effect. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences. 2011(53);182:237–242.
16. Staufenbiel R.W., Schlichting U.J. Stability of airplanes in ground effect. J. of Aircraft. 1988(25);4:289–294.
17. Ulstein T., Faltinsen O.M. Cobblestone effect on surface effect ships. Ship Technology Research. 1996(43);2:78–91.
18. Vassalos D., Xie N., Jasionovski A. et al. Stability and safety analysis of the air-lifted catamaran. Ships and Offshore Structures. 2008(3);2:91–98.

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-5>

Shabarov V., Peplin F.

VASILIIY SHABAROV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

e-mail: isadymacar@yandex.ru

FEDOR PEPLIN, Postgraduate Student, e-mail: f-peplin@yandex.ru

Department of Theoretical, Computer and Experimental Mechanics

Institute for Information Technology, Mechanics and Mathematics

Lobachevsky University

23 Gagarina Av., Nizhniy Novgorod, Russia, 603950

Stability conditions for lifting system of surface effect ships with flexible bags

Abstract: The mathematical model of the surface effect ship's lifting system has been derived from the mass balance equation and the flexible bag's equation. Stability conditions for the system "air cushion – flexible bag" has been obtained. The influence of design parameters on the ship's stability is analyzed. It is shown that the tendency to unstable behavior grows as vehicle's mass becomes larger.

Keywords: ship's stability, air cushion, SES, cobblestone oscillation, Routh–Hurwitz criterion.

REFERENCES

1. Gantmacher F.R. Matrix Theory. M., Science, 1967, 576 p.
2. Irodov R.D. Criteria of Longitudinal Stability of Ekranoplan. Ucheniye Zapiski TSAGI. 1970;1:63–74.
3. Kalyasov P.S., Lubimov A.K. Mathematical modelling of aerodynamics of air cushion vehicle's lifting complex. Lobachevsky Univ. Bulletin. 2008;2:122–127.
4. Kalyasov P.S., Lubimov A.K., Shabarov V.V., Yakimov A.K. Development and application of simulation methods for analysis of amphibious hovercraft's lifting complex. Vestnik of Lobachevsky Univ. of Nizhniy Novgorod. 2009;6:142–151.
5. Kalyasov P.S., Tumanin A.V., Shabarov V.V., Yakimov A.K. Mathematical Modeling of air cushion vehicle's lifting surface. Marine Bulletin. 2011;1:104–107.
6. Collu M., Patel M.H., Trarieux F. The longitudinal static stability of an aerodynamically alleviated marine vehicle, a mathematical model. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2009(466);2116:1055–1075.
7. Connell B.S.H., Milewski W.M., Goldman B. et al. Single and multi-body surface effect ship simulation for T-Craft design evaluation. Proc. of 11th intern. conf. on fast sea transportation. Honolulu, 2011:26–29.
8. Eremeyev V.O., Peplin F.S., Tumanin A.V. Mathematical Model of the dynamics of an Air Cushion Vehicle with ballonnet type skirt on water. Procedia Engineering. 2017(206):354–359.
9. Faltinsen O.M. Hydrodynamics of high-speed marine vehicles. Cambridge Univ. Press, 2005.
10. Hao W., Teo C.J., Khoo B.C. et al. Aerodynamic and stability characteristics of NACA4412 in ground effects. Intern. J. of Intelligent Unmanned Systems. 2013(1);2:145–153.
11. Hirata N., Faltinsen O.M. Computation of Cobblestone effect with unsteady viscous flow under a stern seal bag of a SES. J. of Fluids and Structures. 2000(14);7:1053–1069.
12. Lee J. Computational analysis of static height stability and aerodynamics of vehicles with a fuselage, wing and tail in ground effect. Ocean Engineering. 2018(168):12–22.
13. Matveev K., Kornev N. Dynamics and stability of boats with aerodynamic support. J. of Ship Production and Design. 2013(29):1:17–24.
14. Peplin F., Shabarov V., Tumanin A. Determination of loads acting on the ballonnet type board seal of amphibious hovercrafts. FAST 2017 Conference Proceedings. Nantes, 2017, p. 387–394.
15. Shin S.Y., Whang K.H., Kim K.S. et al. Evaluation of Longitudinal Stability Characteristics Based on Irodov's Criteria for Wing-In-Ground Effect. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences. 2011(53);182:237–242.
16. Staufenbiel R.W., Schlichting U.J. Stability of airplanes in ground effect. J. of Aircraft. 1988(25);4:289–294.
17. Ulstein T., Faltinsen O.M. Cobblestone effect on surface effect ships. Ship Technology Research. 1996(43);2:78–91.
18. Vassalos D., Xie N., Jasionovski A. et al. Stability and safety analysis of the air-lifted catamaran. Ships and Offshore Structures. 2008(3);2:91–98.