УДК 629.5.025.26
EDN: GGLIWS

С.Г. Живица[1, 2]
[1] ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия
[2] ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСПОКОИТЕЛЬНОЙ ЦИСТЕРНЫ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является успокоительная цистерна со свободной поверхностью. Цель – разработка практических рекомендаций по проектированию указанной цистерны для умерения бортовой качки судна.

Материалы и методы. Анализируются результаты как опубликованных, так и выполненных автором экспериментальных научных исследований, посвященных бортовой качке судов, оборудованных успокоительными цистернами со свободной поверхностью.

Основные результаты. Излагаются выводы и рекомендации, определяющие габариты, конфигурацию и местоположение цистерны со свободной поверхностью на судне. По результатам модельных испытаний судна с исследуемой цистерной демонстрируется ее эффективность в умерении бортовой качки, в т.ч. в зависимости от количества отбойных переборок заданной проницаемости. При описании схемы работы успокоительной цистерны со свободной поверхностью обращается внимание на особенности ее настройки во время эксплуатации судна в условиях нерегулярного морского волнения, обуславливающие принцип управления цистерной в рейсе с помощью электронных средств автоматического управления, входящих в бортовой комплекс информационной поддержки экипажа судна.

Заключение. Исследование показало, что при применении на судне цистерны со свободной поверхностью в качестве успокоителя необходимо учитывать особенности ее функционирования, эффективность которого определяется габаритами, формой, расположением относительно центра тяжести судна, количеством и проницаемостью отбойных переборок. Обязательным условием эксплуатации успокоительной цистерны со свободной поверхностью в рейсе является автоматизация управления ею.

Ключевые слова: бортовая качка судна, U-образная успокоительная цистерна, успокоительная цистерна со свободной поверхностью, умерение качки, система автоматического управления.
Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.5.025.26
EDN: GGLIWS

S.G. Zhivitsa[1, 2]
[1] Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia
[2] Saint Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

APPLICATION FEATURES OF ANTI-ROLL FREE SURFACE TANK

Object and purpose of research. The object of research is anti-roll free surface tank. The aim of the work is to develop practical recommendations for the design of the anti-roll free surface tank to decrease roll motions of the ship.

Materials and methods. The results of both published and performed by the author of experimental scientific researches on the rolling of ships equipped with anti-roll free surface tank are analyzed.

Main results. Conclusions and recommendations are presented that determine the dimensions, configuration and location of the anti-roll free surface tank on the ship. According to the results of model tests of the ship with the tank under study, its effectiveness in roll reduction is demonstrated, including depending on the number of baffles with the specified solidity ratio. When describing the operation of the anti-roll free surface tank, attention is drawn to the peculiarities of its adjustment during

Для цитирования: Живица С.Г. Особенности применения успокоительной цистерны со свободной поверхностью. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 2(416): 69–78.

For citations: Zhivitsa S.G. Application features of anti-roll free surface tank. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 2(416): 69–78 (in Russian).

the ship operation in irregular sea waves, which determine the principle of controlling the tank during a voyage by means of electronic automatic control system as a part of the onboard information support system.

Conclusion. The study showed that when using a free surface tank onboard the ship as a stabilizer, it is necessary to take into account the peculiarities of its functioning, the effectiveness of which is determined by the dimensions, shape, location of the tank relative to the ship's center of gravity, the number and inner baffles solidity ratio. A prerequisite for the operation of the anti-roll free surface tank onboard the ship in service is the automation of its control.

Keywords: ship roll motions, anti- roll U-tank, anti- roll free surface tank, roll reducing, automatic control system.

The author declares no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Задача по снижению интенсивной бортовой качки судна в штормовом море является одной из «вечных» в проектной деятельности судостроителей. Недостаточное внимание к ней может дорого обойтись в прямом и переносном смыслах, приведя к потере палубного груза, травмам людей, а в худшем случае – к опрокидыванию судна. Так, в 24 из 44 серьезных происшествий с контейнеровозами, в результате которых контейнеры были потеряны или повреждены, наиболее вероятной причиной стала резонансная или параметрическая бортовая качка. При этом число потерянных или поврежденных контейнеров составило около 85 % от общего числа во всех 44 инцидентах [1].

Пути решения задачи умерения бортовой качки определяются в основном типом и особенностями конструкции судна. При плавании в высоких широтах дополнительно учитываются ограничения на установку в подводной части корпуса судна развитых выступающих частей типа скуловых килей. В таких случаях чаще других успокоителей применяются успокоительные цистерны.

Несмотря на большое разнообразие таких цистерн, в практике проектирования широко распространены всего два вида: U-образная пассивная цистерна, или цистерна Фрама первого рода (т.е. не сообщающаяся с забортной водой), и цистерна со свободной поверхностью (в англоязычной литературе – anti-roll free-surface tank, flume tank, wave flume tank). Оба вида относятся к резонансно-настроенным успокоительным цистернам, эксплуатирующимся в режиме двойного резонанса, т.е. когда судно находится на волнении с периодом, близким к периоду собственной бортовой качки, а цистерна настроена на этот период. Как следствие, колебания судна отстают по фазе от волнового возмущающего момента на 90°, а колебания воды в цистерне в свою очередь отстают от колебаний судна также на 90°, т.е. динамический момент от перетока жидкости в цистерне изменяется в противофазе с возмущающим моментом.

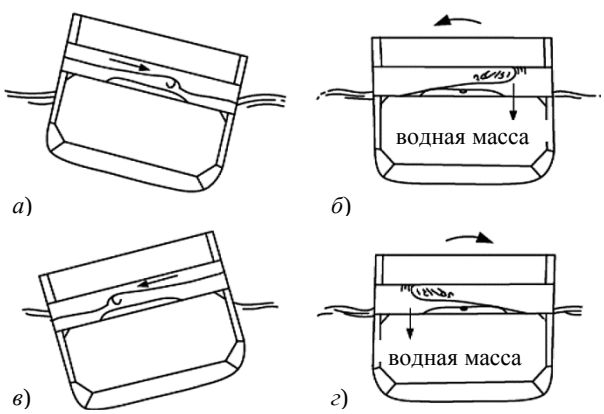


Рис. 1. Принцип действия успокоительной цистерны со свободной поверхностью

Fig. 1. Operational principle of anti-roll free-surface tank

1. Конфигурация успокоительной цистерны со свободной поверхностью

1. Configuration of slack anti-roll tank

Успокоительная цистерна со свободной поверхностью обычно имеет форму, близкую к параллелепипеду. Внутри цистерны поперек потока жидкости устанавливаются перфорированные отбойные переборки, чтобы уменьшить гидродинамические удары в борта, снизить уровень шума при работе цистерны, а также обеспечить ее прочность. Принцип умерения бортовой качки судна с помощью цистерны со свободной поверхностью понятен из рис. 1.

Для примера на рис. 2 приведена фотография грузового судна с цистерной со свободной поверхностью.

Принципиальное отличие цистерны со свободной поверхностью от цистерны Фрама состоит в том, что первую цистерну, варьируя уровень налива воды и тем самым изменяя в ней собственный период колебаний воды, можно настраивать на режим двойного резонанса в достаточно широких пределах, что актуально при ее применении на судах,

нагрузка которых существенно изменяется в процессе эксплуатации.

Дополнительным преимуществом цистерны со свободной поверхностью является тот факт, что при ее использовании сохраняется полезное подпалубное пространство, т.к. достаточно просто может быть реализована возможность размещения такой цистерны на верхней палубе и даже выше (рис. 2). Высокое расположение цистерны со свободной поверхностью обеспечивает значительное (двукратное и более) умерение бортовой качки при относительной массе стабилизирующей жидкости, составляющей менее 2 % водоизмещения судна.

Применяя описанные, например в [3–5], методы, можно вывести подтверждаемые экспериментами принципы, которые определяют габариты, конфигурацию и местоположение успокоительной цистерны со свободной поверхностью на судне:

- наибольший стабилизирующий эффект будет у цистерны с максимальной шириной (размером поперек судна). Это вытекает из того факта, что волновое движение в цистерне подчиняется закону подобия Фруда, из которого следует, что момент от перетекания жидкости в цистерне при неизменном относительном уровне ее заполнения пропорционален кубу ширины цистерны;
- лучшей формой цистерны с точки зрения генерирования наибольшего стабилизирующего момента является такая, метацентрический радиус которой оказывается наибольшим в заданных габаритах цистерны при одних и тех же уровне налива жидкости и собственном периоде колебаний жидкости;
- для динамической системы «судно – цистерна» существует значение коэффициента внутреннего демпфирования жидкости в цистерне, при котором цистерна со свободной поверхностью в выбранном частотном диапазоне будет умерять качку с точки зрения эксплуатации судна оптимальным образом;
- при смещении оси поворота цистерны (оси качания судна) ниже дна цистерны ее стабилизирующий момент будет возрастать и наоборот.

Кроме того, по результатам выполненных экспериментов, начиная с пионерских работ в Технологическом университете в Делфте [6], выяснено следующее:

- при формировании двумерного волнового потока в цистерне стабилизирующий момент становится пропорциональным ее длине (размеру вдоль судна);
- момент, генерируемый «внутренней» жидкостью, примерно пропорционален квадратному корню из амплитуды бортовых колебаний судна, по крайней мере при малой качке. При ее увеличении возрастание момента замедляется, а собственный период колебаний жидкости уменьшается;
- во избежание увеличения момента рыскания судна при динамическом перемещении воды в цистерне ее не следует размещать в оконечностях судна;
- высота цистерны должна минимум в 3 раза превышать глубину налитой в нее жидкости. В противном случае на интенсивном волнении, с одной стороны, возможны удары плескающейся жидкости в крышку цистерны, а с другой – крышка будет ограничивать объем перемещающейся жидкости и, как следствие, амплитуду стабилизирующего момента;
- с гидромеханической точки зрения внутренняя поверхность цистерны со свободной поверхностью должна быть гладкой, т.е. без внутренних ребер жесткости. Тем не менее, как показал эксперимент, если высота ребер не превышает 10 % длины цистерны, их негативное влияние ожидается небольшим.

цистерна со свободной поверхностью

Рис. 2. Успокоительная цистерна со свободной поверхностью на грузовом судне Bohai Hengda [2]

Fig. 2. Anti-roll free-surface tank onboard cargo ship *Bohai Hengda* [2]

Принимая во внимание вышеизложенное, можно констатировать, что оптимальной теоретической формой цистерны со свободной поверхностью, устанавливаемой на открытом пространстве судна (на верхней палубе или выше), является призматический танк с шириной (размером поперек судна),

равной ширине ее опоры. При этом длину цистерны (размер вдоль судна) следует выбирать, с одной стороны, из условия генерирования колеблющейся водой в цистерне такого стабилизирующего момента, который обеспечивал бы необходимый коэффициент умерения бортовой качки, а с другой – из условия удовлетворения нормативным требованиям к поперечной остойчивости судна.

Очевидно, что при практическом проектировании форма и объем успокоительной цистерны со свободной поверхностью могут существенно отличаться от рекомендуемых. Прежде всего это относится к цистернам, устанавливаемым внутри корпуса судна.

Как обозначено выше, у резонансно настроенной цистерны со свободной поверхностью собственный период колебаний воды в цистерне T_t близок к собственному периоду бортовой качки T_θ. Собственный период колебаний жидкости T_t в призматической цистерне при относительно малой глубине ее заполнения и малых амплитудах колебаний равен

$$T_t = \frac{2b_t}{\sqrt{gh_t}}, \qquad (1)$$

где b_t – ширина цистерны; h_t – глубина жидкости в цистерне.

Отметим, что эта формула справедлива для цистерны с гидродинамически гладкой внутренней поверхностью. В случае размещения внутри него демпфирующих конструкций вычисленный в соответствии с выражением (1) собственный период T_t несколько возрастает.

Для судов с высокой остойчивостью и, как следствие, относительно малым собственным периодом бортовых колебаний уровень заполнения цистерны со свободной поверхностью водой, удовлетворяющий условию $T_t \approx T_\theta$, будет соответствовать массе воды, позволяющей при ее динамическом перемещении с борта на борт эффективно умерять бортовую качку, поскольку собственный период колебаний воды в цистерне обратно пропорционален $\sqrt{h_t}$.

Для судна с малой метацентрической высотой и, соответственно, большим собственным периодом бортовых колебаний значение «резонансной» глубины воды в цистерне может оказаться слишком малым, чтобы соответствующая ей масса перемещающейся с борта на борт жидкости умеряла бортовую качку в достаточной степени. Чтобы не увеличивать массу воды за счет длины цистерны, ее дно может быть изготовлено выпуклым, как показано на рис. 3, где высота $\tilde{h}_t$ определяет глубину заполнения цистерны без учета выпуклости.

Локально поднятое дно цистерны воздействует на поток колеблющейся жидкости подобно банке (отмели) в акватории, вызывая больший стабилизирующий момент по сравнению со случаем цистерны с плоским дном. Выпуклость дна цистерны может иметь разные форму и габариты [7], выбор которых определяется экспериментально.

Цистерна со свободной поверхностью с гидродинамически гладкой внутренней поверхностью в частотной области, близкой к резонансу, в максимальной степени умеряет бортовую качку. При этом на частотах набегающих волн, удаленных от резонанса, цистерна может работать как раскачиватель. Природа этого явления лежит в механике связанных динамических систем [8].

Из сказанного напрашивается очевидное проектное решение: устанавливая внутри цистерны демпфирующие колебания жидкости конструкции, одновременно можно свести к минимуму два нежелательных явления – раскачивающее действие цистерны на частотах вне резонансного волнения и ударные нагрузки от колеблющейся жидкости на бортовые стенки и подволок цистерны.

Дополнительным положительным эффектом от установки демпфирующих конструкций является возможность смягчения требования к минимальной высоте цистерны: вместо трехкратной высоты по отношению к глубине жидкости в гидродинамически гладкой цистерне достаточно обеспечить двукратное превышение [9]. Одним из подтверждений этого эмпирического правила могут служить результаты модельных испытаний судна с цистерной со свободной поверхностью, оборудованной демпфирующими переборками, в мореходном бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (далее – Крыловский центр).

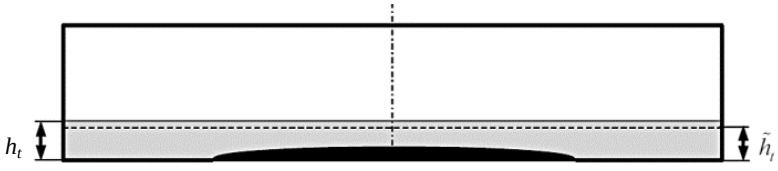


Рис. 3. Схема успокоительной цистерны со свободной поверхностью с выпуклым дном

Fig. 3. Sketch of anti-roll free-surface tank with partially raised bottom

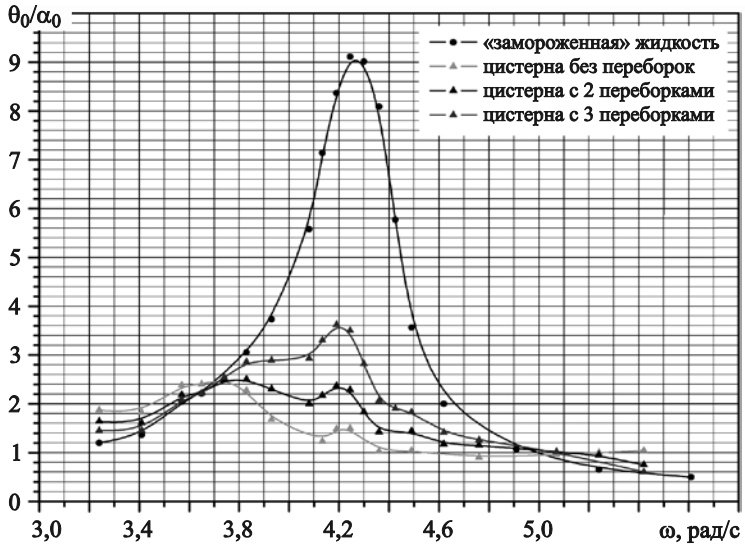


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики бортовой качки модели судна, оборудованной успокоительной цистерной со свободной поверхностью [4]

Fig. 4. Roll response amplitude operator of ship model equipped with anti-roll free-surface tank [4]

Они, в частности, показали, что при уменьшении высоты крышки цистерны H_t с величины $H_t = 2{,}5h_t$ до $H_t = 1{,}6h_t$ ее эффективность, в зависимости от интенсивности воздействующего на судно волнения, снижалась на 17–22 %.

Демпфирующие конструкции, как правило, представляют собой либо перфорированные отбойные переборки заданной проницаемости, либо установленные в ряд пиллерсы с выбранным шагом. Здесь под коэффициентом проницаемости понимается отношение суммарной площади отверстий в переборке к общей площади переборки.

По результатам экспериментов в Норвежском морском технологическом институте Marintek и опыта эксплуатации постепенно выработалась рекомендация по количеству и местоположению отбойных переборок [10]: цистерна со свободной поверхностью оборудуется тремя или двумя перфорированными переборками с коэффициентом проницаемости 0,5, расположенными на расстоянии около ¼ ширины цистерны симметрично относительно ее продольной оси, и одной в центре (если применяются три переборки).

В Крыловском центре были проведены испытания модели судна, оборудованного успокоительной цистерной со свободной поверхностью, во время которых исследовалось влияние числа отбойных переборок в цистерне со свободной поверхностью θ_0/α_0 на качку судна в условиях лагового волнения. Как результат испытаний, на рис. 4 показан набор амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) бортовой качки модели судна без учета колебаний воды в цистерне (состояние «замороженная» жидкость) и с работающей цистерной без, с двумя и тремя переборками.

На рис. 4 использованы обозначения: α_0 – амплитуда угла волнового склона; θ_0 – амплитуда бортовой качки; ω – частота набегающих волн.

Форма и расположение отверстий в переборках могут варьироваться. Так, в [11] изучалось влияние проницаемости и формы отверстий, показанных на рис. 5, на стабилизирующий момент

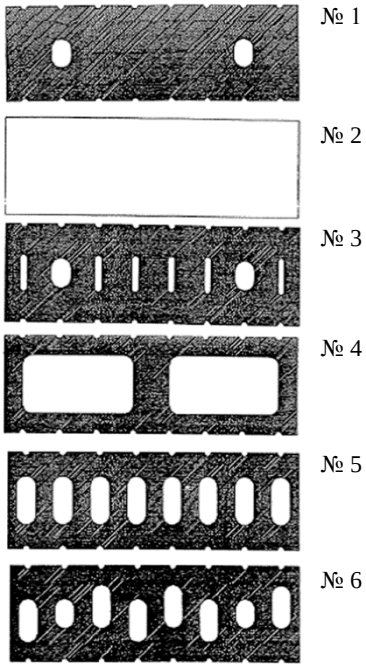


Рис. 5. Конфигурация тестируемых переборок (№ 2 соответствует случаю отсутствия переборки в цистерне во время испытаний)

Fig. 5. Configurations of tank girders tested

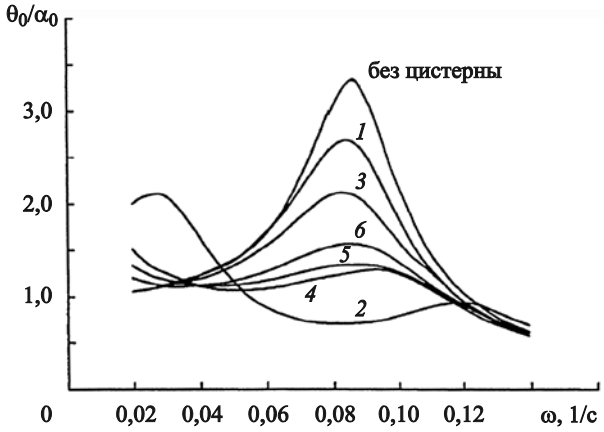


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики бортовой качки судна с цистерной со свободной поверхностью с отбойными переборками разной конфигурации; относительный уровень заполнения цистерны 50 % [11]

Fig. 6. Roll response amplitude operator of ship equipped with anti-roll free-surface tank with different configurations of tank girders; relative tank filling level 50 % [11]

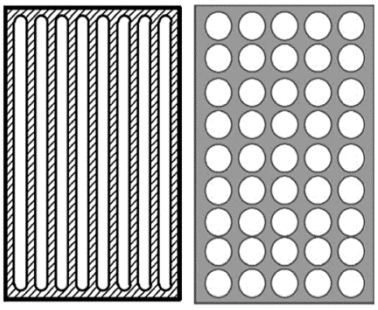


Рис. 7. Конфигурация отбойной переборки с коэффициентом проницаемости 0,5

Fig. 7. Configurations of tank girder with solidity ratio of 0.5

цистерны и бортовую качку судна. АЧХ последней приведена на рис. 6.

В качестве примера на рис. 7 приведены другие конфигурации отбойных переборок.

Используемый вместо перфорированных переборок набор пиллерсов можно видеть на рис. 8.

Пиллерсы, запечатленные на фото, представляют собой трубные конструкции, снабженные по бокам пластинами, обеспечивающими фиксированные линии отрыва потока при прохождении водного потока между пиллерсами. Как отмечено в [12], испытанные цистерны признаны весьма эффективными.

2. Принципиальная схема работы успокоительной цистерны со свободной поверхностью

2. Principal layout of slack anti-roll tank operation

Подытоживая изложенное, можно предложить типовую форму успокоительной цистерны со свободной поверхностью. Под этим подразумевается общая, без детализации конструктивных элементов форма успокоительной цистерны в виде призматического отсека с установленными внутри проницаемыми переборками той или иной конструкции, которая зарекомендовала себя в эксплуатации как наиболее практичная, с одной стороны, с точки зрения обеспечения максимальной эффективности и применения простого математического аппарата для моделирования ее работы, а с другой – с точки зрения технологичности ее изготовления и обслуживания.

Успокоительная цистерна со свободной поверхностью может располагаться как внутри корпуса судна, так и выше верхней палубы. В последнем

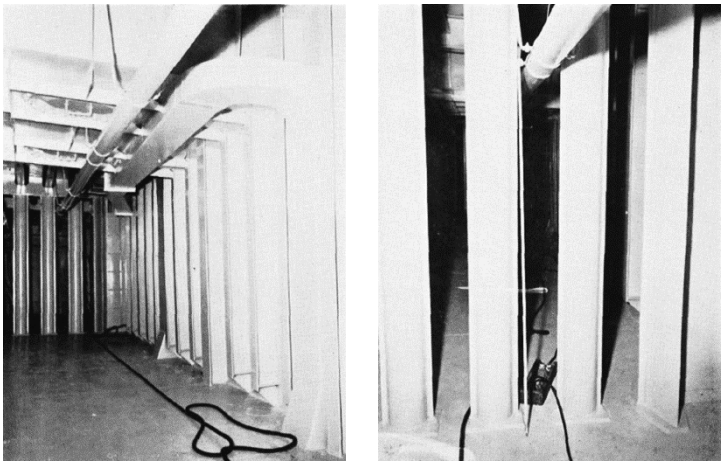
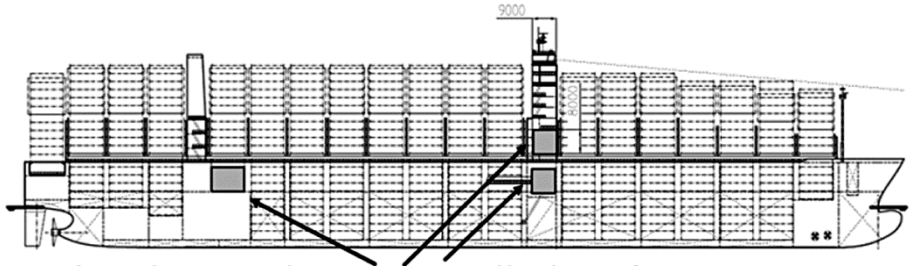


Рис. 8. Внутреннее устройство успокоительной цистерны со свободной поверхностью судна USS Atka [12]

Fig. 8. Anti-roll free-surface tank internal structure of ship *USS Atka* [12]

Рис. 9. Схема размещения успокоительной цистерны со свободной поверхностью на контейнеровозе [13]

Fig. 9. Layout of anti-roll free-surface tank onboard the containership [13]



случае должны быть предусмотрены конструктивные меры по обеспечению незамерзаемости рабочей жидкости в цистерне при ее эксплуатации при низких температурах окружающей среды. Одна из применяемых схем размещения успокоительной цистерны со свободной поверхностью приведена на рис. 9. Для наглядности она представлена в компоновке контейнеровоза.

Как выше отмечено, эффективное умерение бортовой качки судна с помощью цистерны со свободной поверхностью возможно, когда собственная частота колебаний жидкости в цистерне близка к частоте собственных бортовых колебаний судна. При этом амплитуда стабилизирующего момента от перемещения жидкости в цистерне будет максимальной. Очевидно, что это условие строго выполняется, когда судно качается на резонансном регулярном волнении. В условиях морского нерегулярного волнения на судно в поперечной плоскости действует не одна, а одновременно множество волновых гармоник со своей частотой и фазой, образующих в сумме волновой частотный спектр. В результате на нерегулярное волнение судно реагирует более сложным образом, нежели на действие гармонической волны одной частоты.

Например, эксперименты, выполненные в Крыловском центре с разнообразными типами судов, испытывающими бортовую качку на лаговом нерегулярном волнении разной интенсивности, период пика волнового спектра T_ρ которого варьировался, показали, что в общем случае средний период бортовой качки судна $\overline{T}_\theta$ отличается от собственного периода T_θ. В графической форме отклонение среднего периода от собственного периода бортовой качки судна в зависимости от отношения T_ρ/T_θ показано на рис. 10.

Таким образом, при эксплуатации судна в условиях морского нерегулярного волнения для достижения максимального умерения бортовой качки судна собственный период колебаний воды в успокоительной цистерне со свободной поверхностью должен стремиться, строго говоря, не к собственному периоду бортовой качки судна, а к его среднему периоду $\overline{T}_\theta$ на нерегулярном волнении, который может заметно отличаться от собственного периода T_θ, как видно из рис. 10.

Отсюда следует принцип управления успокоительной цистерной со свободной поверхностью во время эксплуатации судна: начальный уровень заполнения водой цистерны, при котором развивается наибольший стабилизирующий момент при воздействии гармонического возмущения на резонансном периоде бортовых колебаний судна, должен измениться таким образом, чтобы амплитуда стабилизирующего момента достигла максимума при периоде качки $\overline{T}_\theta$.

Начальный уровень заполнения цистерны выбирается исходя из величины собственного периода бортовых колебаний судна. Как правило, в рейсе текущая величина собственного периода бортовых

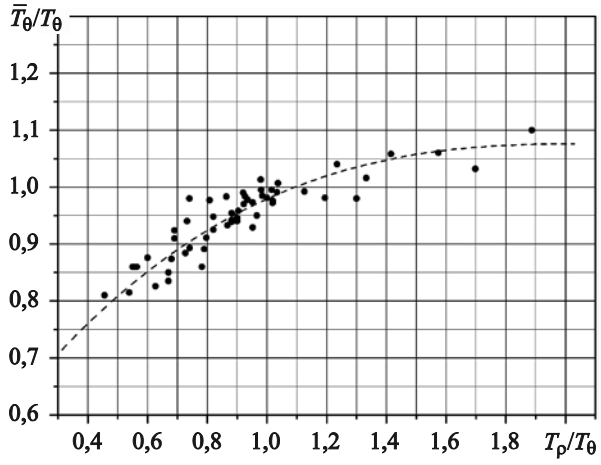


Рис. 10. Изменение среднего периода бортовой качки судна в зависимости от соотношения его собственного периода и периода пика спектра волнения

Fig. 10. Change in average ship roll period versus ratio of natural roll period and wave spectrum peak period

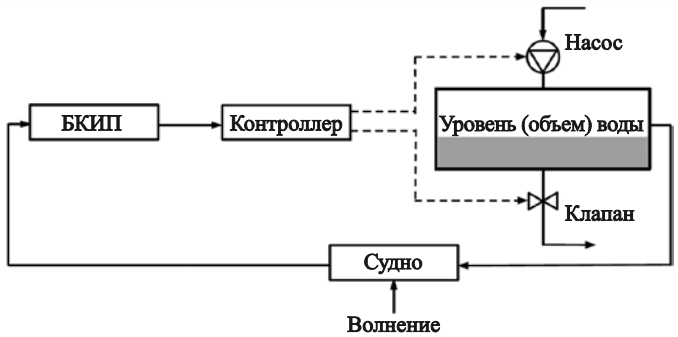


Рис. 11. Блок-схема автоматического управления успокоительной цистерной со свободной поверхностью [2]

Fig. 11. Flow chart of anti-roll free-surface tank automatic control [2]

колебаний судна определяется расчетным путем, используя данные по кренованию судна и расходованию запасов, как регламентировано в информации об остойчивости, разрабатываемой для каждого судна. Предварительно определив на проектной стадии расчетом или с помощью испытаний макета цистерны на раскачивающем устройстве, имитирующем бортовую качку судна, зависимость $T_t(h_t)$, при которой колеблющаяся в цистерне жидкость генерирует максимальный стабилизирующий момент, несложно произвести корректировку начального уровня заполнения цистерны.

В 1960–1970-х гг. настройка успокоительной цистерны со свободной поверхностью в принципе на этом заканчивалась, либо процедура повторялась для двух-трех характерных случаев нагрузки судна, после чего выбиралась осредненная глубина жидкости, при которой цистерна и эксплуатировалась. С развитием электронных средств автоматического управления стало возможным снабжать судовую цистерну со свободной поверхностью обратной связью, позволяющей регулировать уровень заполнения цистерны непосредственно в рейсе. Условная блок-схема такой регулировки изображена на рис. 11.

Аббревиатура БКИП на рис. 11 обозначает бортовой комплекс информационной поддержки экипажа судна, представляющий собой информационную систему, которая получает, хранит и обрабатывает информацию, необходимую для оценки и прогноза динамической остойчивости судна. БКИП является составной частью интегрированной системы ходовой рубки, навигационно-информационной системы и централизованной судовой системы мониторинга и сигнализации. Аппаратные средства БКИП состоят из основного модуля, периферийной аппаратуры и каналов связи. Основной модуль – это высокопроизводительный персональный компьютер, имеющий каналы для соединения с датчиками информации о ветре, волнении, параметрах движения судна. Он устанавливается в ходовой рубке и включает в себя системный блок, монитор, управляющую панель.

Для управления успокоительной цистерной со свободной поверхностью к основному модулю БКИП подключается компьютерная подсистема – контроллер, который рассчитывает характерную амплитуду и средний период бортовой качки судна путем статистической обработки записи, произведенной с помощью датчика параметров качки в течение заданного промежутка времени. Следующей задачей контроллера является управление работой подключенных к ней периферийных устройств – насосов и клапанов дренажной системы.

Обратная связь системы автоматического управления уровнем (объемом) воды в цистерне осуществляется через сравнение фактического среднего периода бортовой качки судна с собственным периодом колебаний воды в цистерне, наполненной по уровень, соответствующий расчетному собственному периоду бортовой качки. В случае расхождения в значениях этих периодов (с заданной точностью) контроллер посылает управляющий сигнал либо к насосам, накачивающим дополнительный объем воды, либо к клапанам дренажной системы для стока излишков воды из цистерны.

Заключение

Conclusion

С практической точки зрения наилучшей гидродинамической формой успокоительной цистерны со свободной поверхностью, устанавливаемой на открытом пространстве судна (на верхней палубе или выше), является призматический танк с максимально возможной по техническим соображениям шириной.

Длина цистерны должна выбираться, с одной стороны, из условия генерирования колеблющейся водой в цистерне такого стабилизирующего момента, который обеспечивал бы необходимый коэффициент

умерения бортовой качки, а с другой – из условия удовлетворения нормативным требованиям к поперечной остойчивости судна. Успокоительная цистерна со свободной поверхностью оборудуется тремя или двумя перфорированными переборками (или их аналогами) с коэффициентом проницаемости, приблизительно равным 0,5, расположенными на расстоянии примерно в ¼ ширины цистерны симметрично относительно ее продольной оси, и одной в центре (если применяются три переборки).

Во избежание увеличения момента рыскания судна при динамическом перемещении воды в цистерне ее не следует размещать в оконечностях судна. Высота цистерны должна минимум в 2 раза превышать глубину налитой в нее воды. В противном случае на интенсивном волнении, с одной стороны, возможны удары плескающейся воды в крышку цистерны, а с другой − крышка будет ограничивать объем перемещающейся воды с борта на борт и, как следствие, амплитуду стабилизирующего момента.

Основной принцип настройки успокоительной цистерной со свободной поверхностью во время эксплуатации судна: начальный уровень заполнения водой цистерны, при котором развивается наибольший стабилизирующий момент при воздействии гармонического возмущения на резонансной частоте бортовых колебаний судна, должен измениться таким образом, чтобы амплитуда стабилизирующего момента достигла максимума при фактической средней частоте бортовой качки на нерегулярном волнении. Этот принцип реализуется в принципиальной блок-схеме автоматического управления успокоительной цистерной со свободной поверхностью, предусматривающей использование бортового компьютера и типового судового оборудования.

Список использованной литературы

1. TopTier model tests and simulations on parametric roll behavior of two large container vessels / *R. Grin* [et al.] // Ocean Engineering. 2026. Vol. 343. P. 123370. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.123370.
2. LSTM-based prediction control of free-surface tank / *S. Zhang* [et. al.] // 2023 International conference on marine equipment & technology and sustainable development (METSD 2023) : proceedings. Singapore : Springer, 2023. P. 1013–1028. (Lecture notes in civil engineering ; vol. 375). DOI: 10.1007/978-981-99-4291-6_71.
3. *Бородай И.К., Виленский Г.В., Слесаревич Е.С.* Оптимизация плоских успокоительных цистерн // Исследования мореходных качеств судов в опытовых бассейнах : сборник статей к 200-летию со дня рождения Вильяма Фруда. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. С. 143–153.
4. *Живица С.Г.* Расчет бортовой качки судна, оборудованного успокоительной цистерной со свободной поверхностью // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3, ч. 1. С. 56–65. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.023.
5. *Balser L.* Roll response of ship fitted with passive stabilizing tank // Polish maritime research. 2004. Vol. 11, No. 3. P. 12–20.
6. *Bosch J.J. v. d., Vugts J.H.* On roll damping by free-surface tank // Transactions of Royal institution of naval architects. 1966. Vol. 108. P. 159–169.
7. Passive anti-rolling tank : pat. 2886441 Europe / *B.-H. Jung*. No. 14189059.0; appl. 15.10.2014; publ. 24.06.2015, Bul. No. 26. 8 p.
8. Успокоители качки судов / *А.Н. Шмырев, В.А. Моренштильдт, С.Г. Ильина, А.И. Гольдин.* 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Судостроение, 1972. 478 с.
9. *Carette N., Dallinga R.P., Kapsenberg G.K.* On the design of anti-roll tanks / Proceedings of International symposium on practical design of ships and other floating structures (PRADS’2016). Copenhagen, 2016. Vol. 4. P. 58–65.
10. *Faltinsen O.M., Timokha A.N.* Sloshing. Cambridge : Cambridge University Press, 2009. 577 p.
11. *Lee B.S., Vassalos D.* An investigation into the stabilization effects of anti-roll tanks with flow obstructions // International Shipbuilding Progress. 1996. Vol. 43, No. 433. P. 70–88.
12. Roll stabilization by means of passive tanks / *J. Vasta, A.J. Giddings, A. Taplin, J.J. Stilwell* // Transaction Society of naval architects and marine engineers. 1961. Vol. 69. P. 411–460.
13. *Blekey N.* CMA CGM newbuild will have new automatic roll stabilization system // Marine Log : [site]. 2020. July 13. URL: https://www.marinelog.com/technology/cma-cgm-newbuild-will-have-new-automatic-roll-stabilization-system/ (Accessed: 01.11.2025).

References

1. TopTier model tests and simulations on parametric roll behavior of two large container vessels / *R. Grin* [et al.] // Ocean Engineering. 2026. Vol. 343. P. 123370. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.123370.
2. LSTM-based prediction control of free-surface tank / *S. Zhang* [et. al.] // 2023 International conference on marine equipment & technology and sustainable development (METSD 2023) : proceedings. Singapore : Springer, 2023. P. 1013–1028. (Lecture notes in civil engineering ; vol. 375). DOI: 10.1007/978-981-99-4291-6_71.

3. *Boroday I.K., Vilensky G.V., Slesarevich Ye.S.* Optimization of flat anti-roll tanks // Seakeeping studies of ships in tests tanks. Compendium of papers to 200th anniversary of William Froude. St. Petersburg : Krylov Central Research Institute. 2010. P. 143–153 (*in Russian*).
4. *Zhivitsa S.G.* Roll motions estimation of a ship equipped with anti-rolling free-surface tank // Marine Intellectual Technologies. 2024. No. 3, Part 1. P. 56–65. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.023 (*in Russian*).
5. *Balser L.* Roll response of ship fitted with passive stabilizing tank // Polish maritime research. 2004. Vol. 11, No. 3. P. 12–20.
6. *Bosch J.J. v. d., Vugts J.H.* On roll damping by free-surface tank // Transactions of Royal institution of naval architects. 1966. Vol. 108. P. 159–169.
7. Passive anti-rolling tank : pat. 2886441 Europe / *B.-H. Jung*. No. 14189059.0; appl. 15.10.2014; publ. 24.06.2015, Bul. No. 26. 8 p.
8. Ship motion dampers / *A.N. Shmyrev, V.A. Morenshildt, S.G. Ilyina, A.I. Goldin*. 2nd ed., rev. and enl. Leningrad : Sudostroenie, 1972. 478 p. (*in Russian*).
9. *Carette N., Dallinga R.P., Kapsenberg G.K.* On the design of anti-roll tanks // Proceedings of International symposium on practical design of ships and other floating structures (PRADS'2016). Copenhagen, 2016. Vol. 4. P. 58–65.
10. *Faltinsen O.M., Timokha A.N.* Sloshing. Cambridge : Cambridge University Press, 2009. 577 p.
11. *Lee B.S., Vassalos D.* An investigation into the stabilization effects of anti-roll tanks with flow obstructions // International Shipbuilding Progress. 1996. Vol. 43, No. 433. P. 70–88.
12. Roll stabilization by means of passive tanks / *J. Vasta, A.J. Giddings, A. Taplin, J.J. Stilwell* // Transaction Society of naval architects and marine engineers. 1961. Vol. 69. P. 411–460.
13. *Blekey N.* CMA CGM newbuild will have new automatic roll stabilization system // Marine Log : [site]. 2020. July 13. URL: https://www.marinelog.com/technology/cma-cgm-newbuild-will-have-new-automatic-roll-stabilization-system/ (Accessed: 01.11.2025).

Сведения об авторе

Живица Сергей Григорьевич, к.т.н., доцент ФГБОУ «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»; ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-49-51. E-mail: 2_otd@ksrc.ru.

About the author

Sergey G. Zhivitsa, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Saint Petersburg State Marine Technical University; Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-49-51. E-mail: 2_otd@ksrc.ru.

Поступила / Received: 12.03.26
Принята в печать / Accepted: 05.05.26
© Живица С.Г., 2026