

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУДОВОЙ СИСТЕМЫ БАЛЛАСТИРОВКИ

Малахов А. В., Палагин А. Н., Маслов И. З., Гудилко Р. Г.

### 1. Введение

Современные тенденции в развитии водного транспорта, используемого для перевозки крупногабаритных и нестандартных грузов на судах погрузного типа требуют использование новых подходов к технологии их эксплуатации. На первое место выходят требования к повышению надежности их работы на волнении и сокращению сроков проведения погрузочно-разгрузочных операций без снижения показателей аварийности.

Специфические особенности конструктивного исполнения таких судов во время операций приемки или сдачи груза всегда приводят к одной и той же проблеме – возникновению и дальнейшему хаотическому движению воздушных полостей внутри заполненных водой балластных танков судна.

Вследствие большого объема таких полостей их инерционные характеристики во время движения внутри объема жидкости могут приводить к усилению качки судна. Также они дают высокие дополнительные нагрузки на корпус судна и могут приводить к возникновению аварийных ситуаций с отрицательным исходом – потерей груза, затоплением судна и т. п.

С учетом этого в работе своего решения требует очень актуальная научно-техническая задача, которая заключается в разработке новых принципов функционирования технических систем судов погрузного типа. Эти принципы должны обеспечить существенное повышение качества эксплуатации судов за счет использования новой системы устранения избыточного воздуха из рабочих объемов балластных танков и снижения аварий, связанных с дополнительной качкой судна.

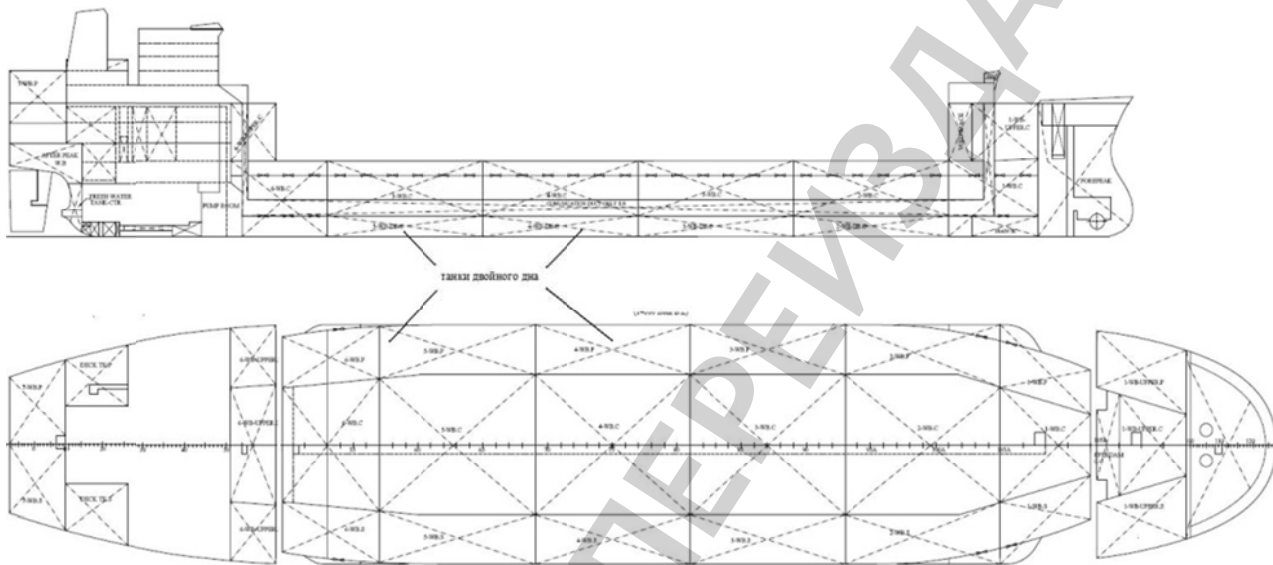
### 2. Объект исследования и его технологический аудит

*Объектом данного исследования* является процесс затопления или всплытия судов погрузного типа в условиях волнения морской поверхности. Основные проблемы, которые возникают во время такого процесса, связаны с поддержанием дифферента судна. Единственным техническим приемом в этом случае является комбинированное сочетание операций предварительной и основной балластировки судна. В ходе их проведения непрерывно производится изменение дифферента и крена судна, что связано с наполнением по номерам конкретных танков судна в четкой последовательности и с определенной скоростью заполнения.

Для выявления особенностей данного процесса с точки зрения изменения неконтролируемой качки судна проводился технологический аудит. Его главной целью являлось определение степени влияния паразитных объемов воздуха, плавающих на поверхности балластной воды на нагрузки, возникающие на корпус судна и неконтролируемые углы крена, которые возникают при эксплуатации судна на волнении.

Исследование проводилось на базе балластных танков двойного дна и технологической схемы балластных насосов судна Target компании Dockwise–Boskalis (Голландия). В качестве основного измерительного оборудования использовались автоколлиматор Ultra компании Taylor Hobson (Великобритания), ультразвуковые датчики уровня Mobrey 003 Ultrasonic Level Switch компании Emerson (США), цифровой секундомер, датчики деформации судовой системы управления OSTOPUS (Голландия).

Технологическая схема расположения танков на судне Target приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Расположение танков двойного дна на судне Target

Наблюдения за процессом их заполнения в течение трех рейсов судна позволяет констатировать, что среднестатистическая степень их наполненности всегда неодинаковая поскольку полностью заполнены только 60–70 % танков.

Отличия в остаточных объемах воды в заполняемых балластных танках могут приводить к несоблюдению дифферента судна и ухудшению его остойчивости при нахождении в полностью погруженном под воду состоянии.

При полном заполнении танков практически всегда наблюдается возникновение паразитных объемов воздуха в виде непрерывно движущихся вдоль поверхности воды в танке воздушных пузырей. Максимальное значение их объемов может доходить до 10 % от объема всего танка и составлять от 360 до 672 м<sup>3</sup>. Их движение в балластных танках во время качки судна неизменно приводит к его неконтролируемому дополнительному раскачиванию и повышает вероятность наступления аварии. Следует особо отметить, что амплитуда и направление движения паразитного воздушного пузыря внутри танка никаким образом не связаны с характеристиками волнения морской поверхности или ветровой нагрузкой на корпус судна и являются самопроизвольными. Фактические условия для наступления резонанса, приводящими к перевороту судна всегда остаются не определенными.

### **3. Цель и задачи исследования**

*Цель исследования* – увеличение эффективности работы и повышение эксплуатационных характеристик судов погружного типа путем разработки новой технологии устранения избыточных паразитных объемов воздуха в судовых технологических танках.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Разработать новую технологию подачи ударных струй для разрушения в балластных танках судна больших паразитных воздушных пробок.
2. Установить основные факторы, влияющие на места скопления паразитных объемов воздуха в балластных танках.
3. Изучить закономерности процесса изменения неконтролируемой качки судна на волнении в случае использования разработанной технологии разрушения движущегося в балластном танке паразитного объема воздуха.

### **4. Исследование существующих решений проблемы**

Среди основных направлений, связанных с движением газовых пузырей в замкнутых объемах с жесткими границами, выявленных в ресурсах мировой научной периодики, могут быть выделены:

- движущиеся газовые кластеры в жидкостях [1–3];
- плавание единичных пузырьков в жидкостях [4–7];
- диспергирование газовых струй в жидкостях [8–13].

В применении к рассматриваемой проблеме разрушения паразитных объемов воздуха внутри балластных трюмов судна наиболее близко соответствуют исследования работ [1, 2]. В работе [1] отображены основные условия разрушения газовых объемов в жидкостях, а в работе [2] предложена классификация движущихся в воде структурированных элементов из однокомпонентного газа. Однако в этих работах не описан механизм или способ разрушения таких газовых объемов на поверхности воды и не показаны условия влияния их движения на инерционные характеристики жидкости в целом. Аналогичным образом в работах [8] и [12] рассмотрено только механическое равновесие газового объема в жидкости и возникновение вблизи него характерных гидродинамических структур. При этом нигде не рассматривается движение крупных объемов воздуха в воде при условии динамического воздействия со стороны стенок сосуда в котором они находятся.

Результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что в настоящее время до сих пор не получены теоретические или экспериментальные результаты однозначно указывающие на способы разрушения больших газовых объемов в жидкостях. Также не установлено как они изменяют инерционные свойства жидкости, ограниченной жесткими стенками сосуда. В привязке к техническим особенностям работы судов и процессу разрушения воздушных пузырей в балластных танках судна, выбор наиболее приемлемого технического решения должен базироваться на данных, полученных во время натурных исследований. Натурные исследования необходимо провести в условиях реального судна, работающего при волнении морской поверхности.

## **5. Методы исследования**

В условиях работы судна проведение экспериментов ограничивается техническими условиями его текущей эксплуатации. По этой причине в качестве основных показателей качества работы разработанной системы разрушения паразитных объемов воздуха в балластных танках судна были выбраны неконтролируемый угол его крена и время полной заполнения танков. Эти два параметра можно рассматривать, как показатели эффективности процесса балластировки.

Входные переменные процесса – степень наполненности балластного танка, объем и место расположения паразитного воздушного объема по отношению к стенкам судового танка, а также волнение морской поверхности определялись при помощи автоматизированных средств измерения. Выборка данных эксперимента формировалась в едином файле судовой системы управления OSTOPUS.

Первые три переменные измерялись набором ультразвуковых датчиков уровня со статистической обработкой их выходного сигнала судовой системой управления OSTOPUS, а текущие данные о волнении морской поверхности поступали с судовой управляющей системы CARGOMASTER (Голландия).

Выходные переменные процесса – неконтролируемый крен судна и время заполнения танков измерялись также в автоматическом режиме. Крен измерялся при помощи автоколлиматора с погрешностью и стабильность измерения углов по всему настраиваемому диапазону – 0,2 секунды. Время заполнения балластного танка измерялось при помощи цифрового секундомера. Начало процесса фиксировалось по сигналу на открытие балластного трюмного клапана, а окончание в момент срабатывания на перелив воды верхнего воздушного клапана.

Полное описание стандартной методики может быть найдено, например, в работе [14].

Основными положениями описанной в этой работе методики являлись:

- начало и окончание измерений всегда должно синхронизироваться с началом и окончанием процесса балластировки судовых танков;
- все показания измерительной аппаратуры должны обнуляться перед началом каждой серии измерений;
- условия проведения измерений в каждой серии экспериментов должны быть идентичными по составу и температуре балластной воды, расходно-напорным характеристикам балластных насосов и используемой величине ударного давления в струях;
- измерение всех изменений в угле крена судна всегда необходимо выполнять после стабилизации показаний автоколлиматора.

## **6. Результаты исследований**

Результаты измерения величины уменьшения неконтролируемого угла крена судна при использовании системы разрушения паразитных воздушных объемов в центральных балластных танках судна показаны на рис. 2, 3.

Обращает на себя внимание тот факт, что:

- в случае очень малого волнения морской поверхности (до 0,2 м) изменения как в естественном, так и управляемом крене судна полностью подчиняются

линейному закону. Разница в углах неконтролируемого крена судна при самом максимальном волнении равном 0,2 м составляет величину всего 0,012 градуса;

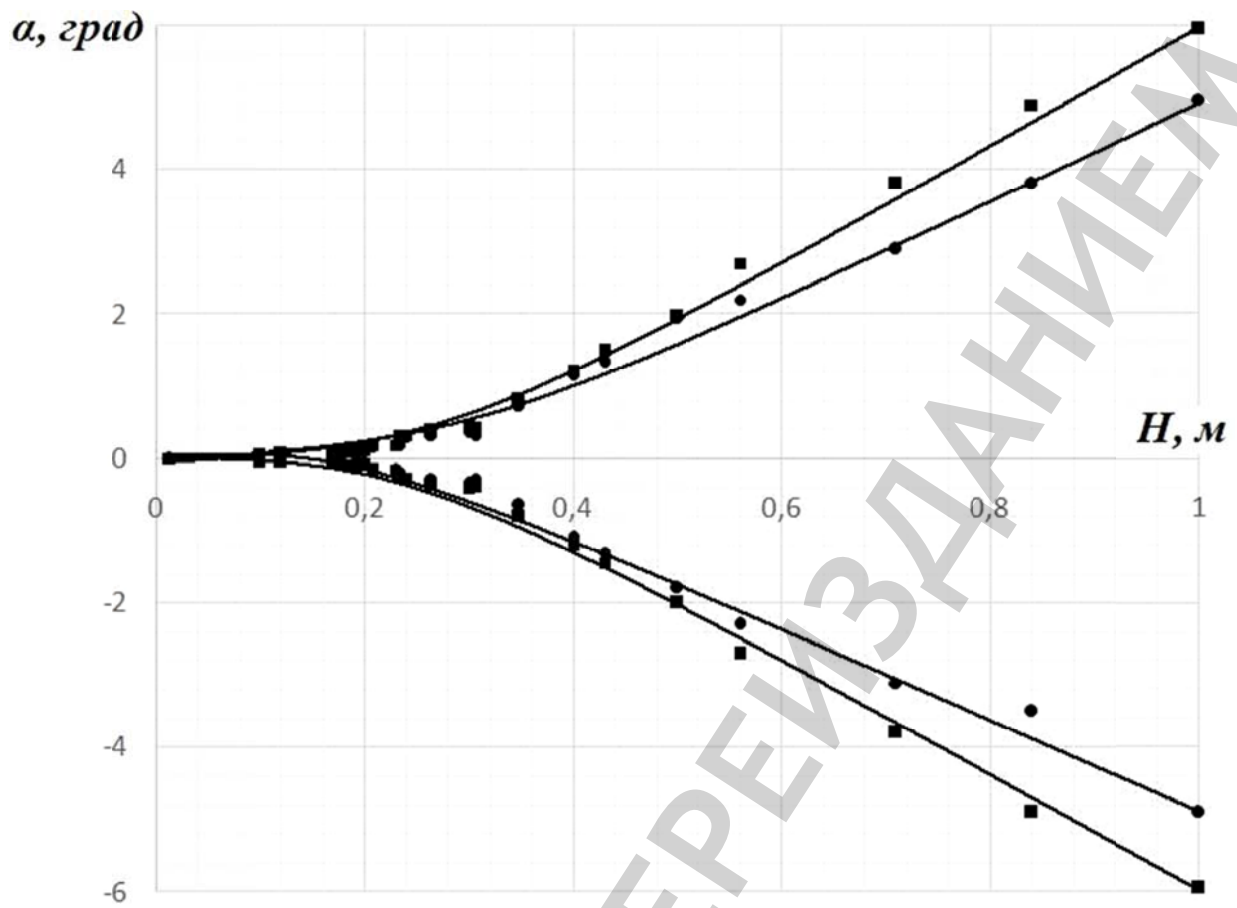
– при высоте волны от 0,2 до 0,3 м наблюдается переходная зона, когда разность углов неконтролируемого крена составляет при максимальном волнении равном 0,3 м величину всего 0,075 градуса;

– при среднем волнении морской поверхности, когда высота волн лежит в диапазоне от 0,3 до 0,5 м. работа системы стабилизации начинает оказывать положительное влияние на остойчивость судна. В случае максимального волнения равного 0,5 м разность между углами неконтролируемого крена при работе системы и без нее составляла уже 0,2 градуса;

– при сильном волнении морской поверхности, когда высота волны находится в диапазоне от 0,56 до 1 м расхождение крена между двумя вариантами измерений постоянно растет. Так, при высоте волны равной 0,56 м максимальная разность неконтролируемых углов крена судна составляла 0,5 градуса, а при высоте волны в 1 м она была равна 1,05 градуса. В процентном соотношении такая разность углов составляет 52,38 %.

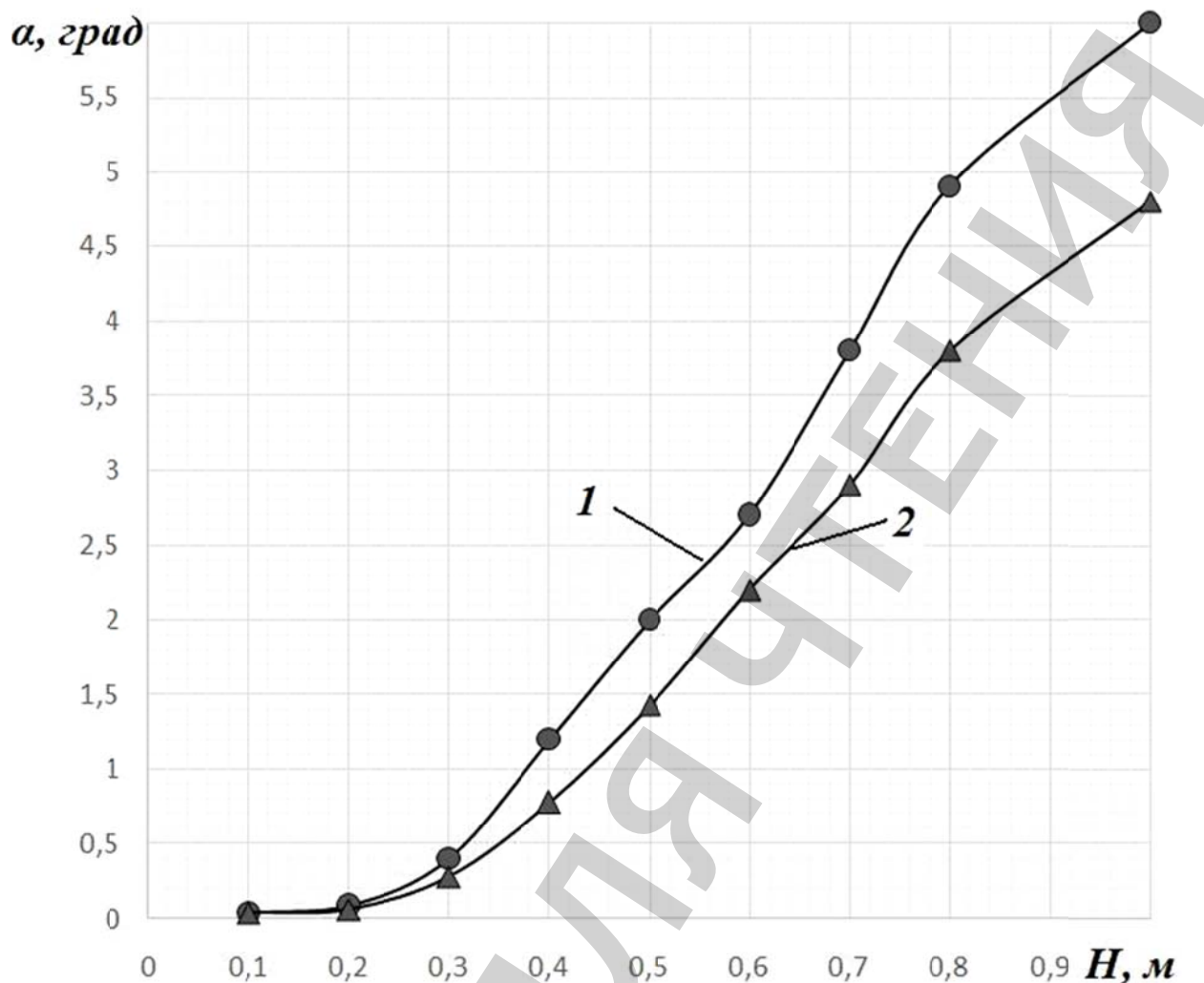
Приведенные на рис. 2 четыре кривые, были получены путем статистической обработки результатов измерений. Они представляют собой номограмму качества работы системы стабилизации крена судна за счет удаления из судовых балластных танков паразитных воздушных объемов.

В результате комплексной оценки всех данных измерений поведения судна на волнении была выполнена проверка эффективности разработанной системы устранения воздушных пробок внутри балластных танков. Одним из основных критериев эффективности и качества работы системы может выступать уровень неконтролируемой качки судна при полном заполнении центральных балластных танков во время погружения палубы судна под уровень морской поверхности.



**Рис. 2.** Неконтролируемый угол крена судна при высоте морской волны в диапазоне от  $H=0,1$  м до  $H=1$  м:

■ – работа судна без системы; ● – работа судна с системой



**Рис. 3.** Оценка эффективности работы системы устранения воздушных пробок  
1 – работа судна без системы; 2 – работа судна с системой

Для количественной оценки влияния присоединенной массы воздушных объемов внутри танков на остойчивость судна с и без работы системы стабилизации было установлено, что:

- при волнении морской поверхности равной 0,5 м уровень неконтролируемой качки судна во время погружения под воду был снижен с 2 до 1,5 градусов;
- время заполнения на 100 % объема балластных танков, при работе системы сократилось по сравнению со временем стандартной операции по их заполнению на 12 %;
- по данным систем OCTOPUS и CARGOMASTER, установлено, что при балластировке судна нагрузки на его корпус во время работы системы были снижены по сравнению с обычным погружением на 3,4 %.

Адекватность полученных данных оценивалась путем оценки их доверительного интервала воспроизводимости в различных условиях работы судна и путем сопоставления данных измерений с результатами работы датчиков судовых управляющих систем OCTOPUS и CARGOMASTER.

Анализ полученных результатов (рис. 2) позволяет сделать вывод о хорошем качестве работы, разработанной в ходе исследований струйной технологии

разрушения паразитных объемов воздуха непосредственно в процессе балластировки танков судна.

## 7. SWOT-анализ результатов исследований

*Strengths.* Среди сильных сторон данного исследования необходимо отметить полученные результаты по главным эксплуатационным параметрам судов погружного типа – неконтролируемого угла крена и времени полного заполнения судовых балластных танков. В пользу этого утверждения свидетельствуют приведенные выше результаты качки судна в широком диапазоне высоты волнения морской поверхности. Именно по этой причине в практических условиях эксплуатации во время погружения или всплытия судна очень сложно выбрать правильный режим изменения его дифферента и кренования. Использование же полученных данных относительно влияния волнения морской поверхности на неконтролируемую качку судна позволяет решить задачу выбора рациональной скорости изменения осадки судна. Критериями для процесса управления являются начальный объем паразитного воздуха в балластных танках судна и уровень волнения морской поверхности.

*Weaknesses.* Слабые стороны данного исследования связаны с тем обстоятельством, что предложенные решения на судах технически могут быть реализованы только в случае наличия в их технологических контурах компрессорной системы. Такая система должна создавать ударные воздушные струи.

Вместе с тем существенное повышение надежности таких эксплуатационных характеристик судна как управляемость и остойчивость и, как следствие, снижение уровня его аварийности накладывает особые обстоятельства на компании, которые ими управляют. Иными словами, такой субъективный фактор, как дополнительные затраты на модернизацию судового балластного контура, может стать приоритетным направлением в последующей эксплуатации судна на волнении.

*Opportunities.* Дополнительные возможности, обеспечивающие достижение цели исследования, заключаются в постоянно растущем рынке крупнотоннажных перевозок нестандартных и крупногабаритных грузов. Рассматриваемые суда погружного типа широко эксплуатируются по всему миру. Не смотря на существенные отличия в своих габаритных размерах – в первую очередь в площади палубы и тоннаже эти суда отличаются универсальностью своей конструкции. Это обстоятельство может считаться стимулирующим в том смысле, что постройка судов такого класса должна выполняться с учетом результатов исследования разработанной системы балластировки судна. Именно таким образом задача снижения аварийности судов погружного типа может быть решена в условиях эксплуатации практически любого конкретно взятого судна.

*Threats.* Сложности во внедрении полученных результатов исследования связаны со следующими основными факторами:

– процесс балластировки судна отличается в случае, когда на палубе груз присутствует и когда его нет. Необходимо провести дополнительные исследования по влиянию парусности объектов на палубе на возникающий вклад в неуравновешенный крен судна в обоих вариантах проведения погрузочно-разгрузочных операций;



– в случае отсутствия на судне компрессорной системы для выработки воздуха с повышенным давлением модернизация судна требует существенное использование трудовых и материальных ресурсов. Это в свою очередь может являться существенным ограничением для менеджмента судоходных компаний.

Таким образом, SWOT-анализ результатов исследований позволяет обозначить основные направления для успешного достижения цели исследований.

Среди них:

– необходимость использования разработанной системы баллаستировки на всех судах погружного типа;

– введение в качестве программного блока узла автоматизации разработанной системы;

– использование алгоритма комбинированной работы разработанной системы с судовыми системами OCTOPUS и CARGOMASTER.

## **8. Выводы**

1. Исследовано, что при движении внутри балластного танка большой по объему паразитной воздушной пробки, а соответственно и массы воды за ней, возникает проблема увеличения ее присоединенной массы. Это будет неизменно приводить к росту неконтролируемого угла крена судна.

Существует простой и надежный способ устранения негативных последствий от этого движения. Этот способ заключается в разделении воздушной пробки на ряд мелких и отделенных друг от друга воздушных пузырей. Также возможно ее полное уничтожение на окончательной стадии балластировки судовых танков.

2. Установлено, что работа системы положительно влияет на неконтролируемую качку судна. При волнении морской поверхности 0,5 м угол крена судна был снижен. В начале крен судна при нормальном штатном погружении составлял 2 градуса. При погружении судна с эксплуатацией системы разрушения паразитного воздуха внутри балластных танков он стал равен 1,5 градуса.

3. Показано, что начиная с высоты волнения превышающей значение 0,35 м разработанная система балластировки судна привносит значительный вклад в повышение безаварийной работы судна.

В числовых показателях уровень неконтролируемой качки судна на волнении с работающей системой разрушения паразитного воздушного объема и без нее отличается. При высоте волны в 0,3 м на 0,12 градуса, при высоте волны 0,6 м на 0,65 градуса, а при 1 м на 1,2 градуса.

## **Литература**

1. Massey, B. Mechanics of Fluids [Text] / B. Massey, J. Ward-Smith. – Ed. 7. – CRC Press, 1998. – 744 p.

2. Li, J. Euler-lagrange simulation of flow structure formation and evolution in dense gas-solid flows [Text] / J. Li. – Enschede: University of Twente, 2002. – 212 p.

3. Chashechkin, Yu. D. Fluxes and Structures in Fluids – 2003 [Text] / ed. by Yu. D. Chashechkin, V. G. Baydulov // Processing of International Conference

«Fluxes and Structures in Fluids», St. Petersburg, Russia, June 23–26, 2003. – Moscow: Institute for Problems in Mechanics of the RAS, 2004. – 250 p.

4. Taylor, R. Multicomponent Mass Transfer [Text] / R. Taylor, R. Krishna. – New York: John Wiley&Sons Inc., 1993. – 618 p.

5. Meshkov, D. E. Issledovanie vliianiia obiema vsplyvaiushchego puzyria na harakter techeniia [Text] / D. E. Meshkov, E. E. Meshkov, V. S. Sivolgin // Vestnik Sarovskogo FizTeha. – 2005. – No. 8. – P. 68–73.

6. Briuhanov, O. N. Teplomassoobmen [Text] / O. N. Briuhanov, S. N. Shevchenko. – Moscow: Infra-M, 2012. – 464 p.

7. Landau, L. D. Teoreticheskaia fizika [Text]. Vol. 6. Gidrodinamika / L. D. Landau, E. M. Lifshits. – Ed. 3. – Moscow: Nauka, 1986. – 736 p.

8. White, F. M. Fluid Mechanics (Mechanical Engineering) [Text] / F. M. White. – Ed. 8. – McGraw-Hill, 2015. – 864 p.

9. Khalypa, V. M. Tekhnichna mekhanika ridyny i hazu [Text] / V. M. Khalypa, S. O. Vambol, I. V. Mishchenko, O. V. Prokopov. – Kharkiv: NUTsZU, 2012. – 224 p.

10. Currie, I. G. Fundamental Mechanics of Fluids [Text] / I. G. Currie. – Ed. 4. – CRC Press, 2012. – 603 p.

11. Richardson, J. F. The evaporation of two-component liquid mixtures [Text] / J. F. Richardson // Chemical Engineering Science. – 1959. – Vol. 10, No. 4. – P. 234–242. doi:[10.1016/0009-2509\(59\)80058-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(59)80058-0)

12. Lavrentev, M. A. Problemy gidrodinamiki i ih matematicheskie modeli [Text] / M. A. Lavrentev, B. V. Shabat. – Moscow: Nauka, 1973. – 416 p.

13. Chorin, A. J. A Mathematical Introduction to Fluid Mechanics [Text] / A. J. Chorin, J. E. Marsden // Texts in Applied Mathematics. – Springer US, 1990. – 168 p. doi:[10.1007/978-1-4684-0364-0](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-0364-0)

14. Malahov, A. V. Jet forces analysis for cones [Text] / A. V. Malahov, O. V. Streltsov, I. Z. Maslov, R. G. Gudilko // Proceedings of the 1st International Academic Conference «Science and Education in Australia, America and Eurasia: Fundamental and Applied Science». – Melbourne: IADCES Press, 2014. – Vol. I. – P. 111–115.