

УДК 629.546:539.4+681.7.068

**МОНИТОРИНГ МЕСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ТРЮМОВ  
НАВАЛОЧНЫХ СУДОВ**

*И. П. ЗАВАЛЬНЮК, В. Б. НЕСТЕРЕНКО, О. П. ЗАВАЛЬНЮК*

Херсонская государственная морская академия  
Херсон, Украина

UDC 629.546:539.4+681.7.068

**THE LOCAL STRENGTH OF BULK CARRIERS' HOLDS  
MONITORING**

*I. P. ZAVALNIUK, V. B. NESTERENKO, O. P. ZAVALNIUK*

**Аннотация.** В статье раскрыта актуальная проблема мониторинга местной прочности грузовых трюмов балкеров в случае перевозки грузов, имеющих способность разжижаться при превышении их влагосодержания транспортабельного предела влажности. Акцентировано внимание на отсутствии инструментальных методов контроля как состояния груза, так и механических напряжений отдельных элементов корпусной конструкции. Предложено оборудовать грузовые трюма навалочных судов волоконно-оптическими датчиками деформации, что обеспечит своевременность обнаружения возникновения разжижения груза, динамический контроль механической нагрузки, а также повысит безопасность мореплавания.

**Ключевые слова:** местная прочность, мониторинг, разжижение груза, балкер, волоконно-оптические датчики деформации, механические напряжения, запас прочности, безопасность мореплавания.

**Abstract.** The relevant problem of the local strength of bulk carriers' cargo holds monitoring in the case of the cargo's transport having the ability to liquefy when their moisture content exceeds the transportable moisture limit has been revealed. Attention has been focused on the absence of instrumental control methods of the cargo state and of the mechanical stresses of the hull structure separate elements. It has been proposed to equip the cargo holds of bulk carriers with fiber optic strain sensors in order to ensure timely detection of the occurrence of the cargo liquefaction, dynamic control of the mechanical stress and also to increase the navigation safety level.

**Key words:** local strength, monitoring, liquefaction cargo, bulk carrier, fiber optic strain sensor, mechanical stresses, safety factor, navigation safety.

Согласно отчету Bulk Carrier Casualty Report за 2019 г. Международной ассоциации владельцев сухогрузов Intercargo, в период с 2010 по 2019 гг. мировым флотом потеряно 39 балкеров дедвейтом свыше 10000 т [1]. Причем основной причиной аварий сухогрузов при перевозке навалочных грузов остается их сдвиг и разжижение. Среди 39 вышеупомянутых сухогрузов было восемь жертв с возникновением сдвига груза, а именно шесть сухогрузов, перевозящих никелевую руду из Индонезии, одно судно с мелкозернистой железной рудой, загруженное с высоким содержанием влаги из Малайзии, и одно судно с бокситом из Малайзии. Примечательно,

что наибольшее количество человеческих жертв 106 из 173 случилось в результате разжижения перевозимого груза.

Самые резонансные катастрофы произошли с балкерами Nasco Diamond (2010), Vinalines Queen (2011), Harita Bauxite (2013), Bulk Jupiter (2015), Stellar Daisy (2017) и Emerald Star (2017). Именно эти трагедии вызвали вопросы к общим принципам транспортировки морем грузов группы А с высокой плотностью и способностью разжижения, а также введением ряда поправок в International Maritime Solid Bulk Cargoes Code (Международный морской кодекс перевозки навалочных грузов), вступающих в силу с 1 января 2021 г.

Опасность перевозки рудных грузов и бокситов состоит в том, что, будучи тяжелыми грузами (удельный погрузочный объем менее  $0,7...1,0 \text{ м}^3/\text{т}$ ), они обладают способностью разжижаться в случае, если в процессе погрузки или морской перевозки их влагосодержание превысит установленный для них транспортабельный предел влажности (TML). Причем состояние разжижения наступает, когда масса зернистого груза, насыщенного влагой, под влиянием значительных внешних сил, таких как вибрация, ударные воздействия или качка судна, теряет свое внутреннее сопротивление сдвига и начинает вести себя как жидкость [2]. Кроме того, вследствие небольшого объема, занимаемого рудными грузами, они размещаются в трюме обычного сухогруза на втором дне относительно тонким слоем. Низкое положение центра тяжести тяжелых навалочных грузов при стандартной высоте двойного дна увеличивает метацентрическую высоту и вызывает порывистую и порой опасную бортовую качку. Эти последствия не удается эффективно нейтрализовать чисто технологическими способами в процессе загрузки, например, искусственно повышая центр тяжести груза неравномерным его размещением по трюмам и загрузкой твиндека, или штивку после загрузки.

Поведение разжиженного груза может проявляться появлением одного из двух эффектов [3]:

1) «эффект свободной поверхности» (рис. 1, а), когда груз, перешедший в вязкое разжиженное состояние (пульпу), может перетекать к одному из бортов судна при крене в условиях качки и не полностью возвращаться в обратную сторону. Затем судно может испытывать постепенно увеличивающийся угол крена, что может привести к внезапному опрокидыванию;

2) «эффект скольжения» (рис. 1, б), свойственный для грузов с высоким влагосодержанием, особенно, если груз загружен малым слоем и судно подвергается воздействию больших углов крена. Тогда груз теряет свое сцепление и становится менее липким. Когда судно кренился, верхняя часть груза может отделяться и скользить в одну сторону. Это переносит груз и его вертикальный центр тяжести в одну сторону, что вызывает появление кренящего момента, который негативно влияет на остойчивость судна и может вызвать повреждение элементов конструкции.

Результатом смещения груза в рейсе являются возможные потеря устойчивости судна и возникновение повреждения элементов конструкции (твиндековых палуб, люковых крышек и т. п.) и самого корпуса. Крайний опасный случай – перелом корпуса на волнении из-за резко неравномерной загрузки трюмов по длине судна тяжелым навалочным грузом. Деформации и перелом корпуса с недостаточной общей прочностью могут происходить (и происходили) даже на тихой воде, у причала, при неправильной загрузке железной руды на судах внутреннего плавания.

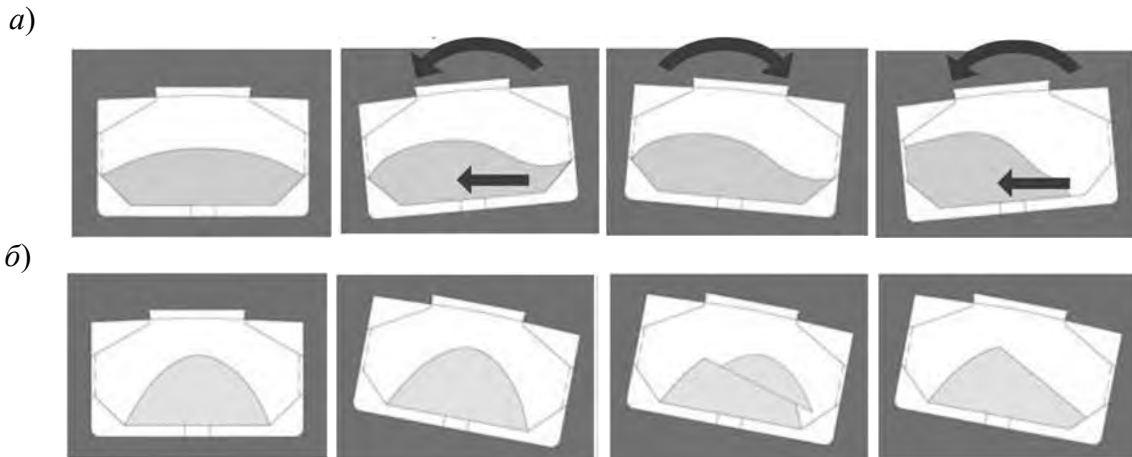


Рис. 1. Поведение разжиженного груза: *а* – «эффект свободной поверхности»; *б* – «эффект скольжения»

Возможные структурные повреждения связаны с тем, что давление, оказываемое на негоризонтальные границы грузового отсека, такие как поперечные переборки, выше для жидкости, чем для насыпного груза. Как правило, давление увеличивается в 2 или 3 раза. Причем вопрос прочности конструкции рудовозов может быть более серьезным, чем для обычных сухогрузов, из-за более высокого заполнения грузового отсека, а также, поскольку границы грузового отсека не рассчитаны на то, чтобы выдерживать затопление. К тому же, если в рудовозы были переоборудованы танкеры с целью продления термина эксплуатации устаревших судов. Примером являются аварийная ситуация и конструкционные повреждения судна *Stellar Daisy* из-за экстремальной нагрузки разжиженного груза. На рис. 2 показаны области трюма, которые требуют особого внимания для стандартного рудовоза с точки зрения обеспечения прочности конструкции.

Так, зонами повышенного внимания являются:

1) продольные переборки, где нагрузки бокового давления будут значительно увеличены на пластинах и ребрах жесткости, что приводит к высокому напряжению сдвига, следовательно, они должны быть усилены;

2) пластины и ребра жесткости нижней части опор будут испытывать более высокие усилия на сжатие и изгиб, поэтому диафрагмы внутри опор могут нуждаться в подкреплении;

3) поперечные гофрированные переборки, усиление которых зависит от соответствующих условий и высоты заполнения грузом.

Кроме приведенных рекомендаций по укреплению соответствующих зон грузовых трюмов, на сегодняшнее время существуют следующие инструкции при перевозке грузов группы А (имеющих способность разжижаться при превышении влагосодержания величины TML) согласно IMSBC Code [2]:

1) при загрузке необходимо проверить показатели содержания влаги согласно грузовой декларации и проводить визуальную инспекцию состояния груза;

2) во время рейса обязательны ежедневные проверка грузового трюма и визуальный контроль состояния поверхности груза, а именно проверка возможного наличия и миграции свободной влаги. Причинами изменения влажности груза могут быть погодные условия и сильные осадки при загрузке, возможные неисправности системы вентиляции и осушения в грузовых трюмах. При необходимости следует предусмотреть возможность вентиляции груза, что зависит от рекомендаций IMSBC Code в отношении конкретного груза;

3) мониторинг за движением судна, в частности периодом бортовой качки. Изменение периода качки может предупреждать об уменьшении метацентрической высоты GM судна.

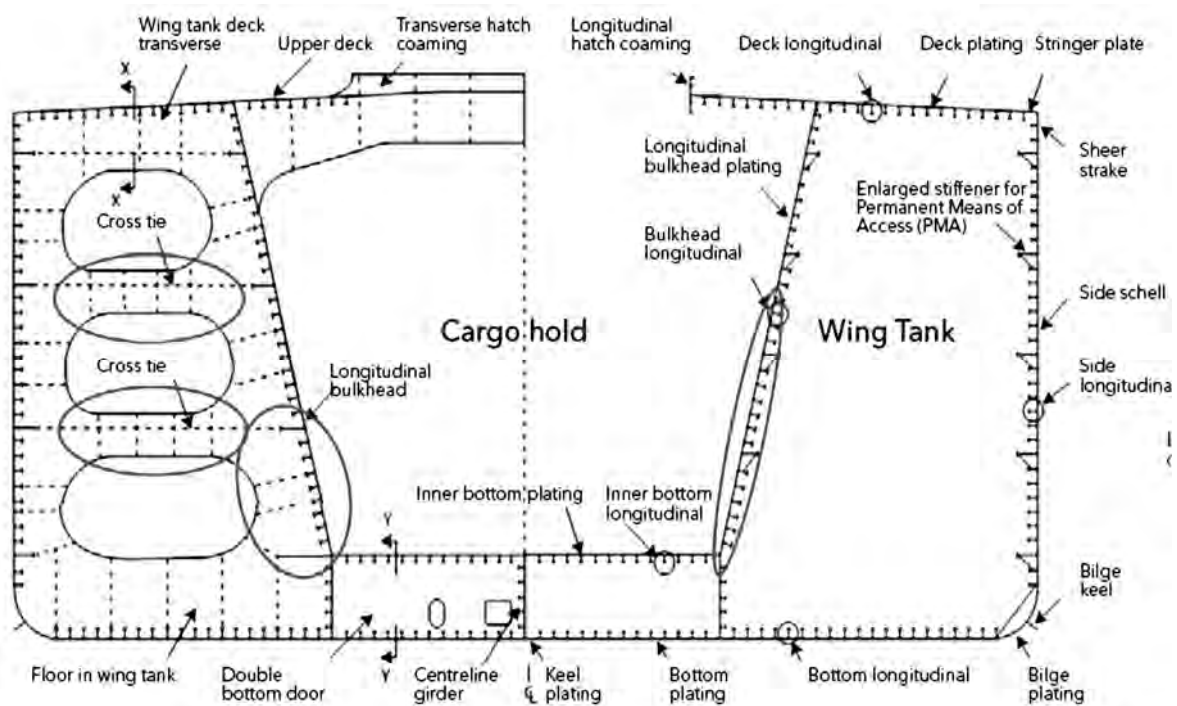


Рис. 2. Зоны грузовых отсеков рудовозов особого внимания

Итак, выводы о состоянии перевозимого рудного груза делаются исключительно по результатам визуального контроля без применения определенных технических средств. Именно человеческий фактор влияет на время выявления разжижения груза и принятия соответствующих мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций.

Поэтому актуальным является предложение об установке в грузовых отсеках навалочных судов системы мониторинга местной прочности трюмов, которая путем фиксации повышенного давления и деформаций переборок позволит своевременно и быстро определить изменение состояния груза, тем самым сохранить целостность конструкции и избежать негативных последствий процесса разжижения груза.

В настоящее время существует ряд датчиков механических напряжений, используемых в автоматизированных системах контроля мореходности (АСКМ) для мониторинга общей и местной прочности: электрические, вибрационные и волоконно-оптические тензометры, магнитоупругие и пьезоэлектрические преобразователи, коэрцитивметрические датчики [5]. Измерители напряжений элементов судового корпуса должны иметь точность не хуже  $5\mu\epsilon$  и быть способными работать в частотном диапазоне  $0 \dots 5$  Гц.

Мониторинг местной прочности проводится АСКМ с целью предупреждения персонала на мостике, что отдельные компоненты структуры корпуса испытывают локальные нагрузки, приближающиеся к уровню, при котором необходимы действия для их уменьшения. Уровни опасных нагрузок для тревог и границы для предупреждений о приближении нагрузок к этим уровням находятся по одобренным методикам с учетом условий их применения.

Интерес представляют волоконно-оптические датчики деформации (ВОДД), которые перед электрическими измерителями механических напряжений имеют следующие преимущества: небольшие размеры, малый вес, высокое быстродействие и чувствительность, неподверженность коррозии, невосприимчивость к электромагнитным помехам, водонепроницаемость. Кроме того, одно волокно может содержать несколько тензометров. Волоконно-оптические устройства не нуждаются в громоздких защитных кожухах. Они могут быть прикреплены к поверхности материала, встроены в конструкции и позволяют измерять растяжения, сжатия контролируемого объекта, давление, температуру, ударные нагрузки.

Известен успешный и эффективный опыт использования волоконно-оптических датчиков деформации в системах контроля внешних нагрузок на корпус судна (SENSFIB Hull<sup>TM</sup>), в системах контроля слошинга (SENSFIB Sloshing<sup>TM</sup>), в системах контроля ледовой нагрузки на корпус судна (SENSFIB Ice<sup>TM</sup>), а также в разгрузочно-погрузочных системах [6–8].

Поэтому авторы предлагают оборудовать ВОДД грузовые трюма балкеров (рис. 3), перевозящих грузы группы А. Это обеспечит в режиме реального времени контроль давления груза на палубу двойного дна, продольные переборки, их ребра жесткости и балки.

Итак, сравнение напряжений в различных точках трюма позволит:

- 1) своевременно обнаружить возникновение разжижения груза;
- 2) осуществить динамический контроль нагрузок при смещении разжиженного груза;
- 3) снизить риск возникновения аварийных ситуаций и повысить безопасность перевозки рудных грузов;
- 4) обеспечить судоводителя информацией о запасе прочности элементов набора корпуса.

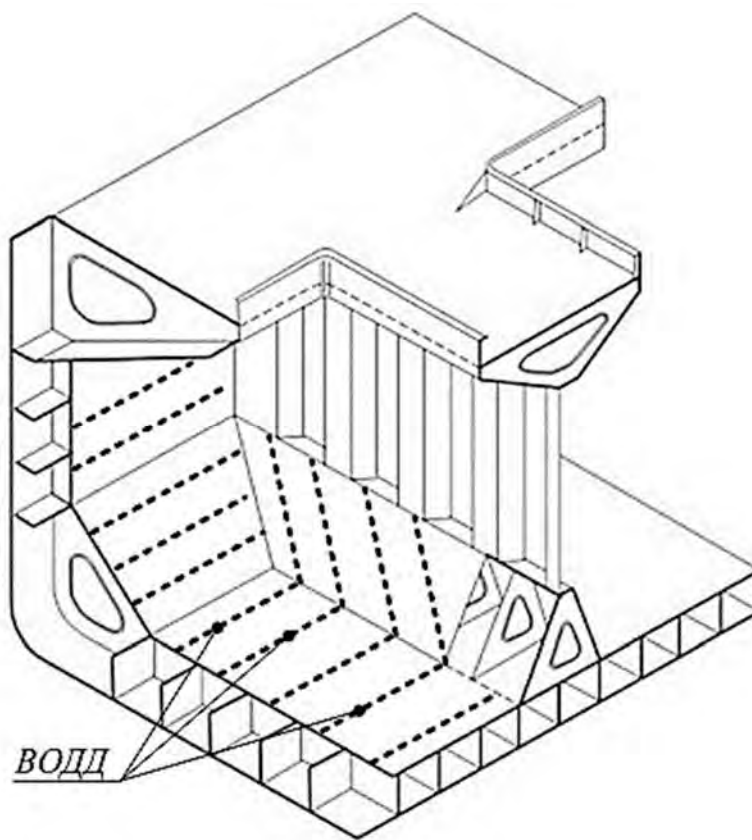


Рис. 3. Места установки волоконно-оптических датчиков деформации в грузовом трюме навалочного судна

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bulk Carrier Casualty Report 2019 [Electronic resource] // International Association of Dry Cargo Shipowners. – UK: London, 2019. – Mode of access: <https://www.intercargo.org/bulk-carrier-casualty-report-2019>.
2. International Maritime Solid Bulk Cargoes Code (IMSBC Code). London: ИМО, 2011. – 140 p.

3. Reducing the risk of liquefaction [Electronic resource] // Neuilly-sur-Seine: Bureau Veritas. – France: Paris, 2017. – Mode of access: <https://group.bureauveritas.com/reducing-risk-liquefaction-new-guidance>.

4. Bulk cargo liquefaction. Guideline for design and operation of vessels with bulk cargo that may liquefy [Electronic resource] // DNV GL. – Norway: Oslo, 2019 – Mode of access: <https://www.dnvgl.com/maritime/publications/bulk-cargo-liquifaction.html>.

5. **Мирошников, В. В.** Контроль прочности корпуса судна: монография / В. В. Мирошников, О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко. – Херсон: Гринь Д.С., 2015. – 108 с.

6. Hull Stress Monitoring system [Electronic resource] // Light Structures AS. – Norway: Oslo, 2020 – Mode of access: <http://www.lightstructures.no/hmon.html>.

7. **Ivče, R.** Ship's cargo handling system with the optical fiber sensor technology application / R. Ivče, I. Jurdana, S. Kos // Multidisciplinary SCIENTIFIC JOURNAL OF MARITIME RESEARCH POMORSTVO. – 2014. – № 28. – P. 118–127.

8. Development and Applications of Full-Scale Ship Hull Health Monitoring Systems for the Royal Norwegian Navy / H. E. Torkildsen [et al.] // Research and Technology Organisation (NATO). – 2005. – RTO-MP-AVT-124 – P. 22–1–22–14.

E-mail:           zavalnyukinna@gmail.com,           nesterenko\_mast@mail.ru,  
olgazavalnjuk82@gmail.com.