

УДК 167.23:629.545

Г.В. Егоров, А.В. Демидюк, В.И. Тонюк

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЗАЛИВАЕМОСТИ КРАНОВОГО СУДНА С ТРЮМОМ,
НЕ ОСНАЩЕННЫМ ЛЮКОВЫМИ ЗАКРЫТИЯМИ**

На базе существующей методики проведения испытаний по оценке заливаемости контейнерных судов типа «open top» разработана методика оценки заливаемости судна с трюмом для навалочных грузов. Выполнена экспериментальная оценка заливаемости кранового судна с трюмом, не оснащенного люковыми закрытиями. Подтверждена правильность принятых проектных решений.

Ключевые слова: *опытовый бассейн, экспериментальное исследование заливаемости, крановое судно, судно с трюмом без люковых закрытий, регулярное волнение.*

На базі існуючої методики проведення випробувань з оцінки заливання контейнерних суден типу «open top» розроблена методика оцінки заливання судна з трюмом для масових вантажів. Виконана експериментальна оцінка заливання кранового судна з трюмом, що не обладнаний люковими закриттями. Підтверджена правильність прийнятих проектних рішень.

Ключові слова: *дослідний басейн, експериментальне дослідження заливання, кранове судно, судно з трюмом, який не обладнаний люковими закриттями, регулярне хвилювання.*

On the basis of the existing testing methodology the technique for the experimental evaluation of green water ingress into a hold of an open-top crane vessel was developed. The correctness of the design decisions was confirmed.

Keywords: *towing tank, experimental study of green water ingress, crane vessel, open top vessel, regular waves.*

Процедура оценки заливаемости трюмов судов без люковых закрытий существует только для контейнерных судов типа «open top» [1]. Как правило, такие суда являются крупными контейнеровозами «открытого типа» – с большим раскрытием палубы, а также с избыточной высотой надводного борта. Отсутствие люковых закрытий на таких судах положительно влияет на контейнеровместимость, однако требует применения дополнительных технических и проектных решений, обеспечивающих безопасность эксплуатации судна.

Несмотря на то, что первый балкер «open top»-концепции был построен в 1962 году, применение указанной концепции не получило распространения и носит скорее характер перспективных проектов [6].

Постановка проблеми. В Морском инженерном бюро (г. Одесса) разработан проект несамоходного кранового судна проекта CV03 с трюмом для навалочных грузов, не имеющим люкового закрытия. Функционально судно предназначено для проведения рейдовых перегрузочных работ в паре с крупнотоннажным балкером, осадка которого не позволяет ему подойти к причалу при полной загрузке.

Необходимость экспериментальной оценки заливаемости для судна без люковых закрытий, предназначенного для перевозки навалочных грузов, является актуальной задачей в свете того, что требования процедуры [1] не распространяются на суда для перевозки навалочных грузов. Однако, учитывая длительный опыт применения предложенной ИМО экспериментальной оценки [1], было принято решение рассматривать её требования как базовые условия проведения экспериментальных исследований.

Целью исследований являлась экспериментальная проверка выбранной концепции судна, правильности принятых проектных решений в части требований к заливаемости трюма, не оснащенного люковыми закрытиями.

Изложение основного материала. Крановое судно проекта CV03 представляет собой прямоугольный понтон с двойными бортами и двойным дном, кормовая и носовая оконечности – транцевые. Для защиты открытого люкового выреза устроены баковая и ютовая надстройки. Схема общего расположения судна представлена на рисунке 1.

Основные характеристики несамоходного кранового судна проекта CV03 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики кранового судна проекта CV03

Величина	Обозначение	Размерность	Численное значение	
			натурное судно	модель 1:50
1	2	3	4	5
Длина расчетная	L	м	63,65	1,273
Длина по КВЛ	L _{wl}	м	63,65	1,273
Ширина по КВЛ	B	м	24,0	0,48
Осадка	D	м	5,60	0,112
Коэффициент общей полноты	C _B	-	0,993	
Объемное водоизмещение	V	м ³	8511,20	0,06809

Модель кранового судна изготовлена в масштабе 1:50 из фанеры и пенопласта и для придания жесткости усилена деревянными брусками. После сборки наружные поверхности модели покрыты слоем сплава парафина и воска. Процесс создания модели иллюстрирует рисунок 2. Общий вид модели кранового судна проекта CV03 в сборе представлен на рисунке 3.



Рис. 2. Процесс создания модели кранового судна проекта CV03

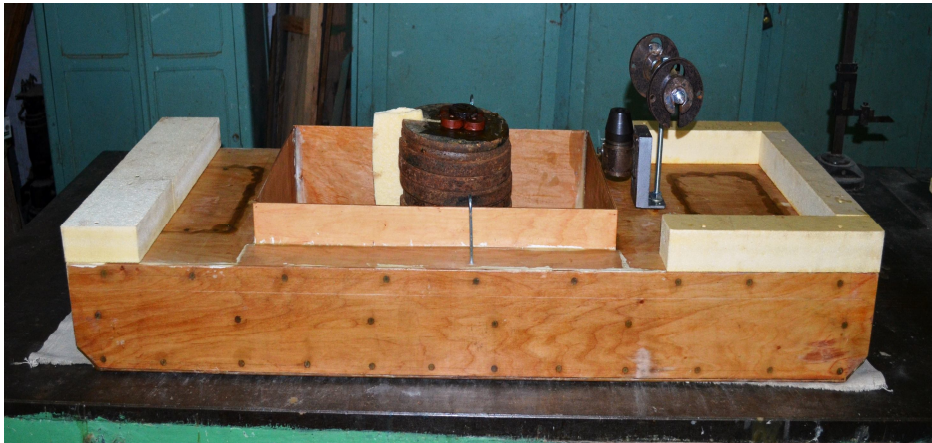


Рис. 3. Общий вид модели кранового судна проекта CV03

Поскольку целью проведения испытаний является оценка заливаемости – динамического следствия качки судна, перед началом испытаний была выполнена динамическая тарировка модели. Её целью являлось приведение в соответствие характеристик начальной остойчивости и инерционных характеристик судна и его модели.

Опыт кренования. Для приведения в соответствие характеристик начальной остойчивости натурального судна и его модели были последовательно проведены несколько опытов кренования. Результаты последнего приближения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты опыта кренования

Номер опыта	Крен-балласт	Угол крена	Момент кренящий $M_{кр} = P \cdot b$	МЦВ, h_0
	кг	градусы	кгм	м
1	0,200	0,640	0,090	0,1173
2	0,400	1,360	0,180	0,1094
3	1,400	4,460	0,630	0,1173
Плечо момента кренящего, $b = 0,450$ м				
Среднее значение поперечной МЦВ, $h_0 = 0,1146$ м				
Аппликата поперечного метацентра модели, $z_m = 0,2289$ м				
Фактическое значение аппликаты центра тяжести модели, $z_{гм\text{ факт}} = 0,1142$ м				
Относительная погрешность, $\varepsilon = \frac{ z_{гм} - z_{гм\text{ факт}} }{z_{гм}} = \frac{ 0,1144 - 0,1142 }{0,1144} = 0,158\%$				

Система измерения углов крена построена на базе аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) общего назначения LCard L-14140, аналогового датчика крена, тензометрического усилителя 8АНЧ7М и персонального компьютера – центра обработки данных. Датчик крена построен на базе полумоста тензорезисторов, размещенных на подвижном элементе датчика, его общий вид приведен на рисунке 6. Тензометрический усилитель 8АНЧ7М осуществляет питание тензорезисторов датчика и усиление сигнала. Сигнал от датчика поступает на АЦП, обрабатывается и передается на персональный компьютер для формирования файла данных.



Рис. 6. Датчик крена

Динамическая тарировка модели. Коррекция моментов инерции масс модели выполнена методом свободных колебаний в воздухе. Модель крепилась к специальному подвесу фиксированной длины l . Общий вид модели на подвесе приведен на рисунке 7.



Рис. 7. Модель на подвесе

В процессе определения моментов инерции масс модели выполнены замеры периодов колебаний модели в воздухе в двух плоскостях – продольной и поперечной. Средний период во всех рассмотренных случаях определялся по замеренному времени полных 100 колебаний модели как физического маятника.

Таблиця 3

Инерционные характеристики и натурного судна и его модели

Наименование	Обозначение	Размерность	Продольные колебания, $i = y$	Поперечные колебания, $i = x$
Период колебаний модели	τ_{iM}	с	2,7370	2,7011
Длина подвеса	l	м	1,787	1,787
Момент инерции масс модели	I_{iM}	кгмс ²	0,9181	0,3213
Момент инерции масс натурного судна	I_{iH}	кгмс ²	2,869E+08	1,004E+08
Радиус инерции масс натурного судна	ρ_{iH}	м	17,964	10,757
Относительный радиус инерции масс судна	$\bar{\rho}_i$	-	0,286	0,170

В таблице 3:

l – длина подвеса (расстояние от точки подвеса до ЦТ модели);

Момент инерции масс модели

$$I_{iM} = \Delta_m l \left(\left(\frac{\tau_{iM}}{2\pi} \right)^2 - \frac{l}{g} \right), \text{ кгмс}^2.$$

Момент инерции масс натурного судна

$$I_{iH} = I_{iM} \lambda^5, \text{ кгмс}^2;$$

$$\rho_{iH} = \sqrt{\frac{g I_{iH}}{\lambda^3 \Delta_m}}, \text{ м};$$

$$\bar{\rho}_i = \frac{\rho_{iH}}{L};$$

$$i = x, y, g = 9,81 \text{ м/с}^2, \lambda = 50.$$

Регулярное волнение. Выполнение требований процедуры [1] для судна, оснащенного пропульсивным комплексом, требует проведения самоходных испытаний модели в мореходном бассейне. Такие бассейны оснащены сложной системой волногенерации, обычно расположенной вдоль двух смежных сторон бассейна. Поскольку крановое судно проекта CV03 является несамоходным, то для проведения экспериментальных исследований достаточно возможностей опытового бассейна ОНМУ.

В настоящее время в опытовом бассейне ОНМУ отсутствуют возможности генерации нерегулярного волнения со спектрами JONSWAP,

Pierson-Moscovits и ISSC [5], которые рекомендованы в [1]. Учитывая класс судна, его район плавания R3 и назначение, было принято решение провести испытания на регулярном волнении, высота которого соответствует высоте 3 % обеспеченности нерегулярного волнения вероятного района эксплуатации судна. Известно [3], что такой подход является более жестким с точки зрения определяемых параметров качки.

Регулярное волнение в бассейне Одесского национального морского университета генерируется пластинчатым волнопродуктором, который приводится в действие с помощью электродвигателя мощностью 3 кВт. Электродвигатель оснащен блоком частотного управления «Schneider Electric», что позволяет регулировать частоту генерации волн с точностью до 0,1 Гц.

Параметры волн в эксперименте определялись с учетом длины модели L из отношения $\frac{\lambda}{L}$. В эксперименте рассмотрены две волны

$$\frac{\lambda}{L} = 2,5 \text{ и } \frac{\lambda}{L} = 2,0.$$

Высота расчетной волны для судна в эксперименте была фиксированной $h = 6,0$ м, что несколько превышает расчетную высоту волны согласно району плавания R3. Исходя из того, что требования [1] регламентируют использование при физическом моделировании наиболее неблагоприятных параметров волнения, крутизна волны $\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{26,5}$ принята

для волны с $\frac{\lambda}{L} = 2,5$, и $\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{21,2}$ для волны с $\frac{\lambda}{L} = 2,0$. Крутизна волнения

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{21,2} \div \frac{1}{26,5} \text{ соответствует открытым морям.}$$

Следует отметить, что принятые характеристики волн являются экстремальными для данного судна и близкими к максимально возможным для опытового бассейна ОНМУ по условиям высоты волны и эффективности системы волногашения.

Параметры регулярного волнения для модели приведены в таблице 4, а для натурного судна – в таблице 5.

Таблица 4

Параметры регулярного волнения (для модели)

λ/L	Длина волны, λ_m	Частота формы волны, k_m	Частота волны, σ_m	Период волны, τ_m	Частота волнопродуктора, $\sigma_{вп}$	Расчетная высота волны, h_m	Радиус волнопродуктора, $r_{вп}$
-	м	1/м	1/с	с	Гц	мм	мм
2,00	2,55	2,47	4,92	1,28	29,00	120,09	175
2,50	3,18	1,97	4,40	1,43	25,90	120,09	175

Таблиця 5

*Параметри регулярного волнення
(для натурного судна)*

λL	Длина волны, λ_n	Частота формы волны, k_n	Частота волны, σ_n	Период волны, τ_n	Расчетная высота волны, h_n
-	м	1/м	1/с	с	м
2,00	127,3	0,049	0,696	9,03	6,005
2,50	159,1	0,039	0,622	10,10	6,005

Параметры регулярного волнения для натурного судна и для его модели связаны обычными соотношениями между элементами гравитационных волн на глубокой воде и соотношениями подбоя.

В таблицах 4 и 5:

$$k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} \text{ – частота формы волны;}$$

$$\sigma_i = \sqrt{g k_i} \text{ – частота волны;}$$

$$\tau_i = \frac{2\pi}{\sigma_i} \text{ – период волны, } i = n, m;$$

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2 \text{ – гравитационная постоянная;}$$

$$\frac{\lambda_n}{\lambda_m} = \lambda,$$

где $\lambda = 50$ – масштабный фактор;

$h_\phi = f(\sigma_m, r_{вп}, K_{вп})$ – фактическая высота генерируемой волны, которая подбирается в процессе подготовки к эксперименту;

$$|h_\phi - h_m| \leq \varepsilon,$$

где $\varepsilon = 2$ мм – с учетом особенностей пластинчатого волнопродуктора и неравномерности генерации регулярного волнения;

$K_{вп}$ – коэффициент редуктора волнопродуктора;

$r_{вп}$ – радиус установки коромысла волнопродуктора.

Подбор высоты волны h_ϕ осуществлен с помощью датчика высоты волны струнного типа. Датчик высоты волны является одной из последних разработок сотрудников опытового бассейна ОНМУ и построен на современной элементной базе, что позволяет использовать его без тензометрического усилителя, сократив число подключаемых устройств. Указанный датчик цифрового типа передает сигнал на аналогово-цифровой преобразователь/регистратор LCard L-14140 и далее – на персональный компьютер для формирования файла данных. Общий вид датчика высоты волны и схема измерительной системы приведены на рисунке 8.

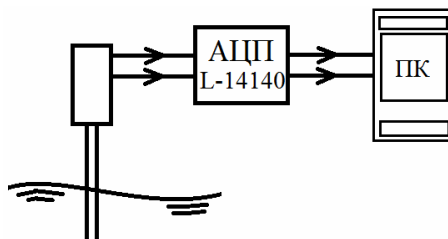
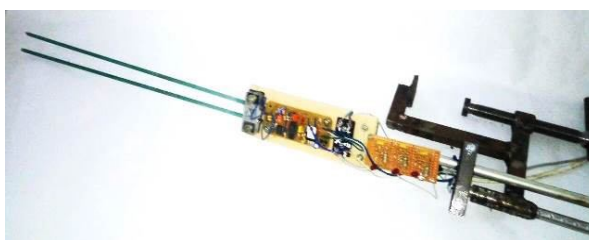


Рис. 8. Общий вид датчика высоты волны и схема измерительной системы

Высоты волн были подобраны при фиксированных характеристиках волнения до начала основных испытаний. При этом датчик волны находился в месте размещения модели в средней части бассейна.

Дополнительный контроль высоты волны осуществлялся также визуально с помощью специальной мерной шкалы, размещенной на борту бассейна (см. рисунки 9, 10 и 11).

Проведение испытаний. Положение судна относительно набегающего регулярного волнения характеризуется курсовым углом, который отсчитывается против часовой стрелки от вектора скорости волнения до положительного направления оси Gx (направленной в нос) системы координат, жестко связанной с судном $Gxyz$.

Испытания проводились на глубокой воде для расчетной осадки при полной загрузке судна. В каждом опыте модель была закреплена к стенкам бассейна на растяжках под указанными ниже курсовыми углами:

- 90° ;
- 45° ;
- 315° ;
- 225° ;
- 135° ;
- 180° .

Документирование процесса проведения модельных экспериментов выполнено с помощью видеофиксации. Для проведения видеосъемки использована размещенная на штативе цифровая фотокамера Nikon D5100, которая обеспечивает режим записи видео в формате 1920x1080 (full HD).

Продолжительность моделирования для натурального объекта, согласно с требованиями [1], определена в 1,0 час, что в пересчете на масштаб модели составляет 8,49 минуты. Время моделирования получено из соотношений подобия для периодов реального и моделируемого волнения.

Оценка количества воды, попавшей в трюм судна, выполнялась после каждого опыта путем измерения её объема с помощью мерного сосуда. Для натурального объекта нормированное согласно с [1] количество жидкости в трюме определяется, исходя из интенсивности заливания – 400 мм/час, умноженной на размеры люкового выреза. Для модели с учетом масштаба критический объем жидкости составил 1,56 л.

Ход испытаний демонстрируют рисунки 9-11, а), б).

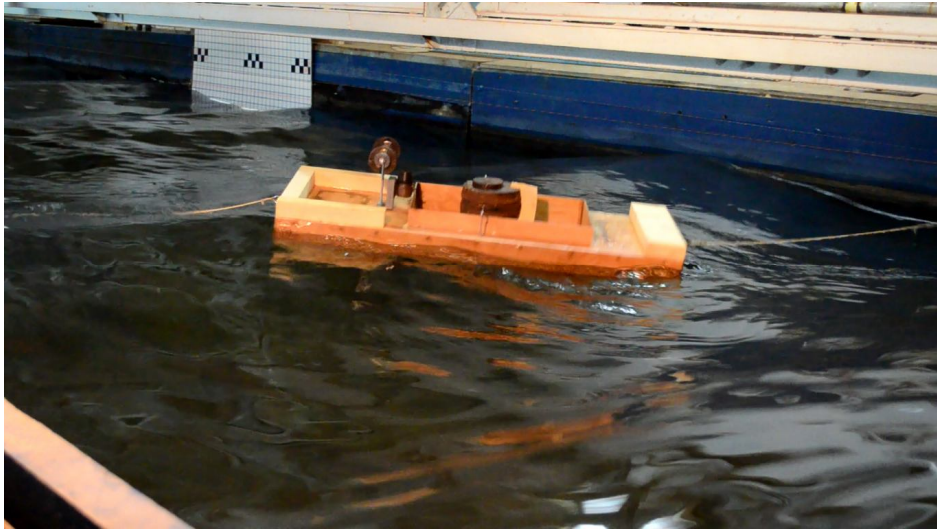


а)

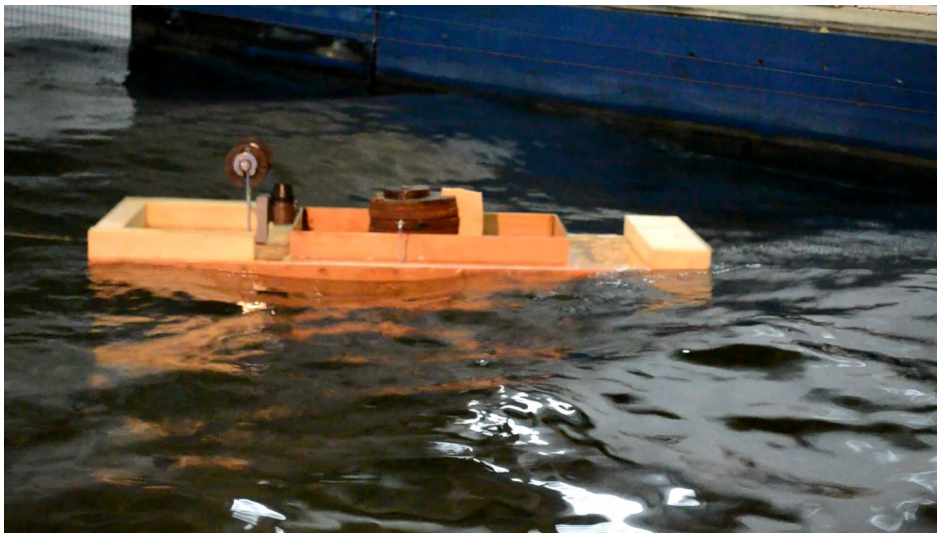


б)

Рис. 9. Судно в полном грузу на регулярном волнении
с $\lambda/L=2,0$; крутизна волн $h=1/21,2$; курсовой угол к волнению 90^0



а)



б)

*Рис. 10. Судно в полном грузу на регулярном волнении
с $\lambda/L=2,0$, крутизна волн $h=1/21,2$; курсовой угол к волнению 45°*



a)



б)

Рис. 11. Судно в полном грузу на регулярном волнении с $\lambda/L=2,5$, крутизна волн $h=1/25$; курсовой угол к волнению 45°

Наибольший интерес представляет положение судна лагом к волне. В этом положении качка судна наиболее интенсивна (см. рис. 9). Заливание палубы судна в этом положении наблюдалось на всех рассмотренных волнах

По результатам испытаний установлено, что в случае полной загрузки судна качка модели на всех рассматриваемых волнах и курсовых углах не приводила к критическому заливанию открытого грузового помещения. Попадание жидкости в трюм зафиксировано только в одном случае при волне с $\frac{\lambda}{L} = 2,0$ и курсовом угле 90° . Зафиксированный объем жидкости составил 54 мл при критическом для данной модели объеме в 1,56 л.

Выводы. В опытовом бассейне ОНМУ выполнена оценка заливаемости кранового судна проекта CV03.

Результаты проведенного эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

- отмечено заливание палубы модели при тупых и острых курсовых углах, при этом волнение воздействует на незащищенные надстройками участки борта;
- на встречном волнении модель испытывает значительную по амплитуде продольную качку;
- при всех рассмотренных сочетаниях волн и курсовых углов качка судна не приводит к критическому заливанию открытого грузового помещения;
- вследствие наличия достаточной высоты борта и комингса грузового трюма даже интенсивное заливание палубы не привело к заливанию трюма. Попадание жидкости в трюм зафиксировано только в одном случае при волне с $\frac{\lambda}{L} = 2,0$ и курсовом угле 90° .

Выполненная экспериментальная оценка заливаемости подтвердила корректность принятых проектных решений о назначении высоты надводного борта, высот комингса грузового трюма, баковой и ютовой надстроек, их формы.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *International Maritime Organization: Interim Guidelines for Open-Top Container Ships. MSC/Circ.608/Rev.1. – London, 1994.*
2. *Buchner B., Joaquín Lopez-Cortijo Garcia.: Design aspects of green water loading on FPSOs. – The 22-nd International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering, Cancun, Mexico. – 8-13 June. – 2003.*
3. *Басин А.М. Качка судов. – М.: Транспорт, 1969. – 272 с.*

4. Благовещенский С.Н. *Справочник по статике и динамике корабля. – Т. 2 / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодильн. – Л.: Судостроение, 1976. – 176 с.*
5. Lloyd A.R.J.M.: *Seakeeping: ship behaviour in rough weather. Ellis Horwood Limited. – England, 1989.*
6. <https://www.marineinsight.com/future-shipping/eco-ship-2020-a-futuristic-open-hatch-bulk-carrier-concept/>
7. Кириллов В.Н., Демидюк А.В., Тонюк В.И. *Экспериментальная установка для исследования гидродинамических и кинематических характеристик продольной качки моделей судов // Вісник ОДМУ: Зб. наук. праць. – Одесса, 1998. – № 1. – С. 90-93.*
8. Демидюк А.В. *Модернизация системы измерений опытового бассейна ОНМУ // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць. – Вып. 34. – Одеса, 2012. – С. 67-76.*

Стаття надійшла до редакції 22.11.2017

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, професор, завідувач кафедри «Машинознавство» Одеського національного морського університету
А.В. Конопльов

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Одеського національного морського університету
А.В. Гришин