

УДК 629.5.012

В.А. Некрасов, Д.А. Дробот, С.А. Череватенко, А.П. Ястреба

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭСКОРТНЫХ БУКСИРОВ  
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ В ОПЫТОВОМ БАССЕЙНЕ  
НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ**

*Представлено склад експериментального устаткування, метод дослідження і обробки експериментальних даних, методика перерахунку на натуру і результати перерахунку на натуру позиційних характеристик сил і моментів, що діють на ескортний буксир під час виконання стаціонарних ескортних операцій.*

**Ключові слова:** дослідний басейн, устаткування, метод дослідження, метод обробки даних, методика перерахунку;

*Представлен состав экспериментального оборудования, метод исследования и обработки экспериментальных данных, методика пересчета на натуру и результаты пересчета на натуру позиционных характеристик сил и моментов, действующих на эскортный буксир во время выполнения стационарных эскортных операций.*

**Ключевые слова:** опытовый бассейн, оборудование, метод исследования, метод обработки данных, методика пересчета;

*Composition of experimental equipment, method of research and processing of experimental data, method of recount on nature and results of recount on nature of position descriptions of forces and moments, operating on an escort tug during implementation of stationary escort operations is presented.*

**Keywords:** towing tank, equipment, research method, method of data processing of, method of recount.

**Введение.** Развитие морских нефтяных терминалов на Черном море обуславливает необходимость эскортного сопровождения танкеров при их подходе к берегу, при движении в узкостях, где ветро-волновые возмущения и течения создают значительные дополнительные усилия, но из-за малой скорости движения снижается эффективность работы рулевых устройств.

Осуществляется такое сопровождение в обязательном порядке с помощью эскортных буксиров, которые проходят аттестацию классификационных обществ по определению развиваемого управляющего воздействия на эскортируемое судно. Соотношение между величинами управляющего воздействия и водоизмещения эскортируемого судна обуславливают уровень надежности эскортной операции, заметно снижает вероятность появления экологических катастроф.

Этим обуславливается большой интерес, проявляемый проектан-тами судов и судовладельцами к определению усилий, создаваемых эскортными буксирами при сопровождении судов, и назначению соответствующего класса конкретному проекту эскортного буксира.

В соответствии с требованиями классификационных обществ [1, 2] для присвоения буксиру эскортного класса необходимо осуществить обоснованный предварительный расчет максимальной удерживающей силы буксира при скорости эскортирования 8 и/или 10 узл., включая расчет пропульсивной мощности, необходимой для обеспечения и поддержания этого усилия.

Обоснование такого расчета и присвоение буксиру соответствующего эскортного класса осуществляется сначала с помощью экспериментальных, а затем и – натуральных исследований.

Однако в Украине, до появления соответствующих работ в Национальном университете кораблестроения, для выполнения соответствующих экспериментальных исследований и пересчета данных эксперимента на натуре не существовало необходимого оборудования и процедур.

**Постановка задачи.** В связи с этими целями работы являлись:

- разработка метода экспериментального определения действующих на эскортный буксир сил при выполнении стационарных эскортных операций;
- создание специального оборудования для опытового бассейна;
- организация экспериментальных исследований проектных характеристик эскортных буксиров;
- сравнение получаемых в результате эксперимента данных с данными натуральных испытаний эскортных буксиров.

**1. Требуемая схема эскортных операций.** В основу определения необходимых характеристик эскортных операций буксира полагается схема эскортного сопровождения, приведенная в требованиях классификационных обществ [1, 2], и системы координат, принятые в теории управляемости судов [3] (см. рис. 1). При этом начало координат системы, жестко связанной с буксиром, расположено в плоскости ватерлинии на пересечении ДП и ПМШ.

На рис. 1 обозначены:  $R_b$  – усилие в буксирном канате;  $x_b$  – расстояние до носового буксирного рыма;  $\alpha$  – угол буксирного каната;  $\beta$  – угол дрейфа эскортного буксира;  $\delta$  – угол упора винторулевых колонок;  $X_c$  – продольная гидродинамическая сила, действующая на корпус эскортного буксира;  $Y_c$  – поперечная гидродинамическая сила;  $M_c$  – гидродинамический момент.  $X_{врк}$  – продольная составляющая полезной тяги двух винторулевых колонок, действующей на корпус буксира при его движении со скоростью  $V_s$  и создаваемом при этом движении углом набегающего потока на ВРК, равном  $(\beta - \delta)$ ;  $Y_{врк}$  – боковая составляющая полезной тяги двух винторулевых колонок, действующей на корпус буксира при его движении со скоростью  $V_s$  и создаваемом при этом движении уг-

лом набегающего потока на ВРК, равном  $(\beta - \delta)$ ;  $x_{врк}$  – расстояние до вертикальных осей винторулевых колонок.

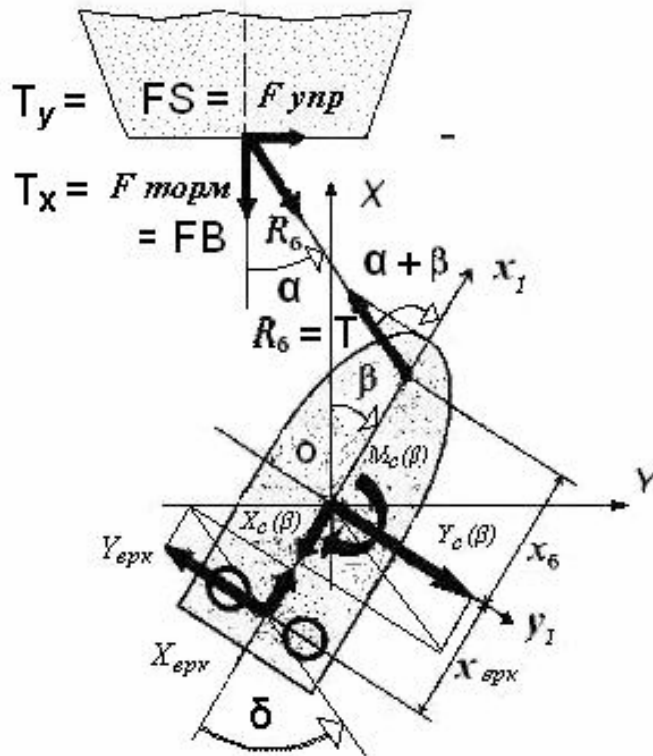


Рис. 1. Схема сопровождения судна эскортным буксиром

**2. Определение действующих сил и моментов.** Равновесие сил, действующих на буксир, достигается в режимах его установившегося движения. Проектные характеристики установившегося режима движения эскортного буксира и сопровождаемого судна определяются на основе решения следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} R_\delta \cos(\beta + \alpha) + X_c(\beta) + X_{врк}(\beta - \delta) &= 0; \\ -R_\delta \sin(\beta + \alpha) + Y_c(\beta) + Y_{врк}(\beta - \delta) &= 0; \\ -R_\delta \sin(\beta + \alpha) x_\delta + M_c(\beta) + Y_{врк}(\beta - \delta) x_{врк} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В результате определяются следующие искомые характеристики, требующие экспериментального подтверждения:

$$\begin{aligned} T &= R_\delta - \text{усилие в буксирном тросе}; \\ T_Y = FS &= R_\delta \sin \alpha - \text{управляющая сила}; \\ T_X = FB &= R_\delta \cos \alpha - \text{тормозное усилие}. \end{aligned} \quad (2)$$

Кренящий момент, вызывающий накренение буксира под действием рассматриваемой совокупности сил, вычисляется по формуле

$$M_H = R_{\sigma} \sin(\beta + \alpha) z_{\sigma} - Y_c(\beta) z_{k+c} + Y_{врк}(\beta - \delta) z_{врк}, \quad (3)$$

где  $z_{\sigma}$  – аппликата точки приложения усилия буксирного каната на носовом буксирном рыме;

$z_{k+c}$  – аппликата точки приложения боковой силы на корпусе и скеге;

$z_{врк}$  – аппликата точки приложения упора ВРК.

Необходимое для проверки остойчивости буксира плечо кренящего момента вычисляется с помощью отношения

$$l_H = M_H / D, \quad (4)$$

где  $D$  – водоизмещение буксира.

Таким образом, основным набором сил и моментов, требующих экспериментального определения, являются силы  $X_c, Y_c$  и момент  $M_c$ .

**3. Модернизация опытового бассейна Национального университета кораблестроения** произведена в 2005-2008 годах на основе разработанного авторами проекта, личного их участия в работах по модернизации и с помощью поставок оборудования и микропроцессорной техники фирмами Шнайдер Электрик (Франция) и ЮАлекс (Украина).



*Рис.2. Опытный бассейн НУК*

Опытный бассейн НУК имеет следующие характеристики: длина 33,0 м; ширина 2,5 м; глубина 1,1 м; максимальная скорость буксировки моделей 6,0 м/с. Бассейн оборудован несамходной буксировочной тележкой и современными компьютеризированными системами: буксировочной системой; системой измерения, накопления и обработки данных; автоматизированной системой управления экспериментом.

Основу буксировочной системы опытового бассейна составляют асинхронный электродвигатель мощностью 7 кВт с номинальным числом оборотов 2880 об/мин. и преобразователь частоты аналогичной мощности, питающиеся от 3-х фазной сети переменного тока напряжением 380V. Встроенный в преобразователь частоты микропроцессор и инкрементальный датчик числа оборотов электродвигателя позволяют выдерживать задаваемую в диапазоне 0,00-6,00 м/с скорость движения моделей с погрешностью до 0,5 % (максимум  $\pm 30$  мм/с).



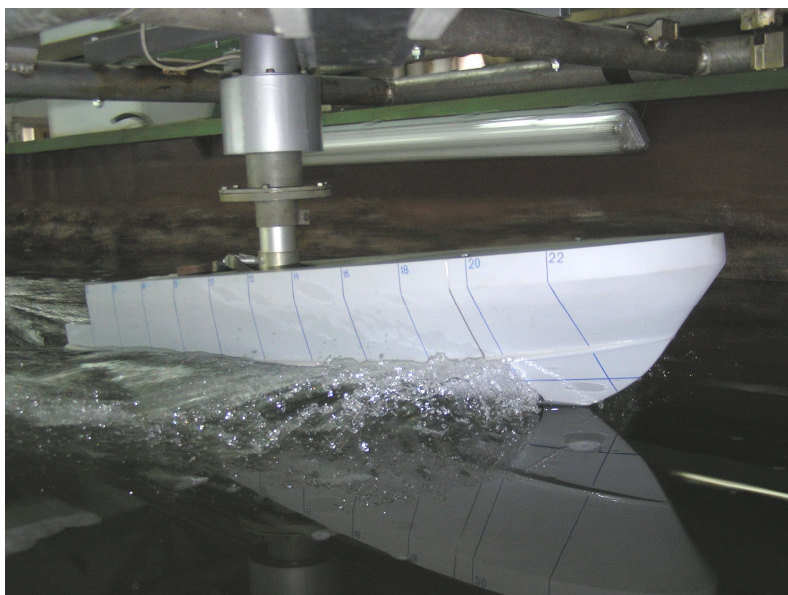
*Рис. 3. Оборудование опытового бассейна НУК*

В трехкомпонентном динамометре действующих на модель сил (продольной  $X_c$  и боковой  $Y_c$  – силы дрейфа, изменяющихся в пределах 0,0-50,0 Н), а также их момента  $M_c$ , используются тензометрические датчики, которые позволяют определить действующие усилия с погрешностью  $\pm 0,02$  Н (максимум  $\pm 2$  грамм силы). Компенсационная система исключения взаимного влияния тензометрических датчиков усилий ортогональных направлений, существенно увеличивающая точность силовых измерений, реализована в виде программного модуля. Свободные вертикальные перемещения модели в пределах  $\pm 50$  мм регистрируются с по-

мощью индуктивного датчика перемещений, погрешность которого составляет  $\pm 0,1$  мм. Угловые перемещения модели в диапазоне  $\pm 15$  градусов определяются акселерометрическим датчиком с погрешностью  $\pm 0,02$  градуса.

Расположенный на буксировочной тележке промышленный компьютер обрабатывает информацию, поступающую от датчиков перемещений модели и действующих сил, накапливает ее и в конце цикла буксировки передает эту информацию на стационарный компьютер Pentium4. Стационарный компьютер с помощью разработанной С.А. Череватенко программы TowingTestsLAB управляет экспериментом как при одиночных пробеггах буксировочной тележки, так и при автоматизированных режимах, в процессе каждого из которых совершается необходимый цикл буксировочных испытаний модели.

Все оборудование и приборы опытового бассейна регулярно проходят метрологическую аттестацию.



*Рис. 4. Испытания модели судна в опытовом бассейне НУК*

**4. Экспериментальное определение действующих сил.** Для проверки выполнения требований классификационных обществ к эскортным буксирам при осуществлении ими эскортных операций с нормативными скоростями хода 8 и 10 узлов в опытовом бассейне НУК по заказам конструкторских бюро Украины проводятся соответствующие буксировки моделей с углами дрейфа, принимающими значения в диапазоне 0-90 градусов. Фото одной из таких буксировок модели эскортного буксира с максимальным тяговым усилием натуре на переднем ходу равным 60 тонн представлено на рис. 5.

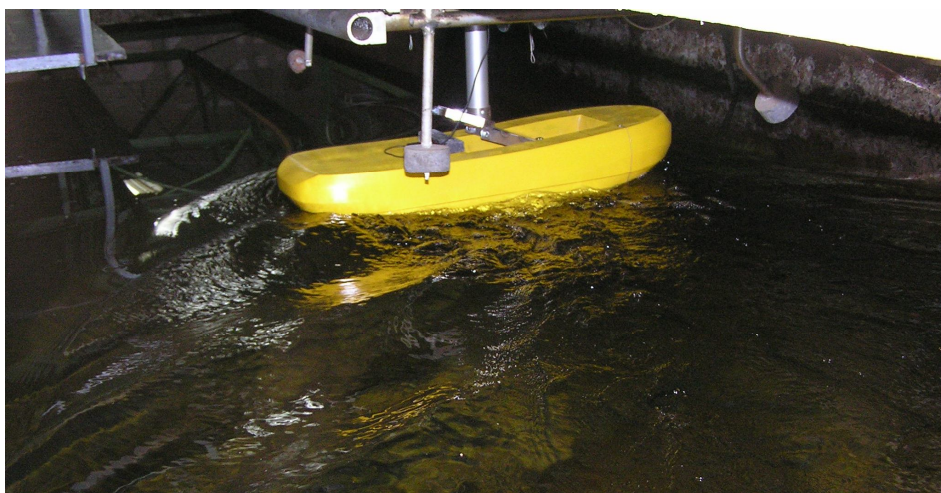


Рис. 5. Движение модели эскортного буксира с углом дрейфа, скорость 0,9 м/с

Крепление модели к буксировочной тележке выполняется таким образом, чтобы модель могла свободно удифферентовываться, но перемещения ее по углу крена были бы ограниченными в соответствии с требованиями классификационных обществ 10-ю градусами.

Модель буксира в процессе эксперимента рассматривается как крыло малого удлинения, вертикально опущенное в воду под углом атаки (дрейфа)  $\beta$  по отношению к направлению движения буксировочной тележки. При этом измеряются сила лобового сопротивления  $X_{cm}$ , подъемная сила «крыла»  $Y_{cm}$ , соответствующие силе удержания буксира на курсе  $FS$  и стопорящей движению силе  $FB$ , а также момент  $M_{cm}$ , соответствующий моменту  $M_c$ .

Целью эксперимента является определение коэффициентов лобового сопротивления  $C_{Xm} = C_{FBm}$ , подъемной силы  $C_{Ym} = C_{FSm}$  и момента  $C_{Mm}$ , которое осуществляется по формулам

$$\begin{aligned}C_{FBm} &= 2 FB_m / (\rho_m V_m^2 S_{bm}); \\C_{FSm} &= 2 FS_m / (\rho_m V_m^2 S_{bm}); \\C_{Mm} &= 2 M_m / (\rho_m V_m^2 S_{bm} L_m),\end{aligned}$$

где  $S_{bm}$  – площадь диаметрального батокса модели при осадке  $T_m$  и длине  $L_m$ ;

$\rho_m$  – плотность жидкости;

$V_m$  – скорость модели.

Пример обработанных данных экспериментальных исследований приведен на рис. 6.

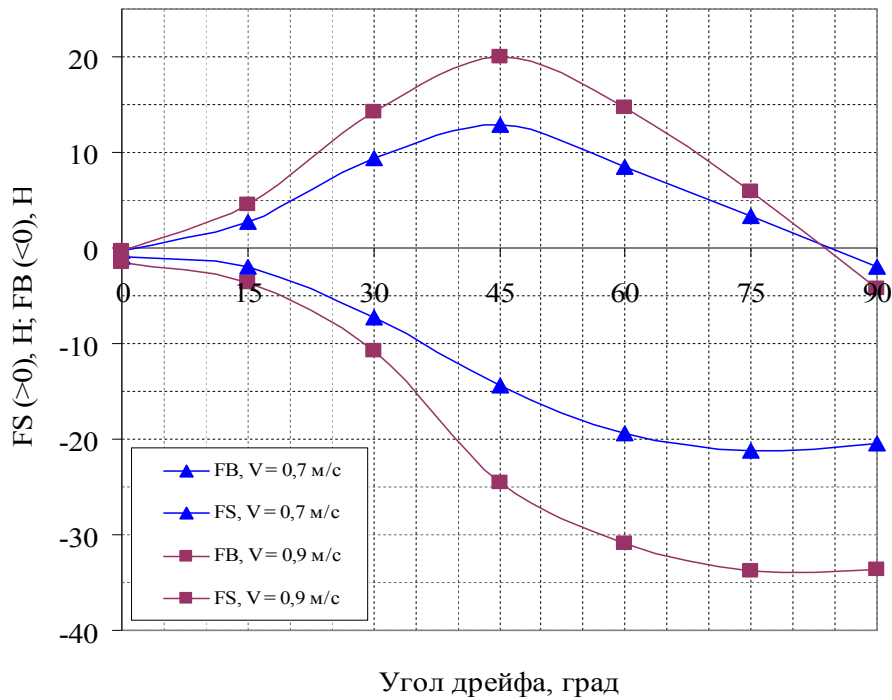


Рис. 6. Стопорящая (вдоль линии движения) и удерживающая на курсе (перпендикулярно линии движения) силы (Braking pull =  $FB_M$  и Steering pull =  $FS_M$ ), действующие на модель эскортного буксира

**5. Пересчет результатов эксперимента на натуре.** Пересчет экспериментальных данных на натуре осуществляется по формулам

$$\begin{aligned} FB_n &= C_{FBM} (\rho_n V_n^2 S_{bn}) / 2; \\ FS_n &= C_{FSM} (\rho_n V_n^2 S_{bn}) / 2; \\ M_n &= C_{MM} (\rho_n V_n^2 S_{bn} L_n) / 2, \end{aligned}$$

где  $S_{bn}$  – площадь диаметрального батокса натуре при осадке  $T_n$  и длине  $L_n$ ;

$\rho_n$  – плотность жидкости;

$V_n$  – скорость натуре.

**6. Сравнение данных пересчета результатов модельных испытаний на натуре с данными натуральных испытаний.** Тот же эскортный буксир, данные модельных испытаний которого и их пересчета на натуре по приведенным формулам представлены на рисунках 5 и 6, прошел натурные испытания. Определяющие результаты натуральных испытаний приведены в таблице.



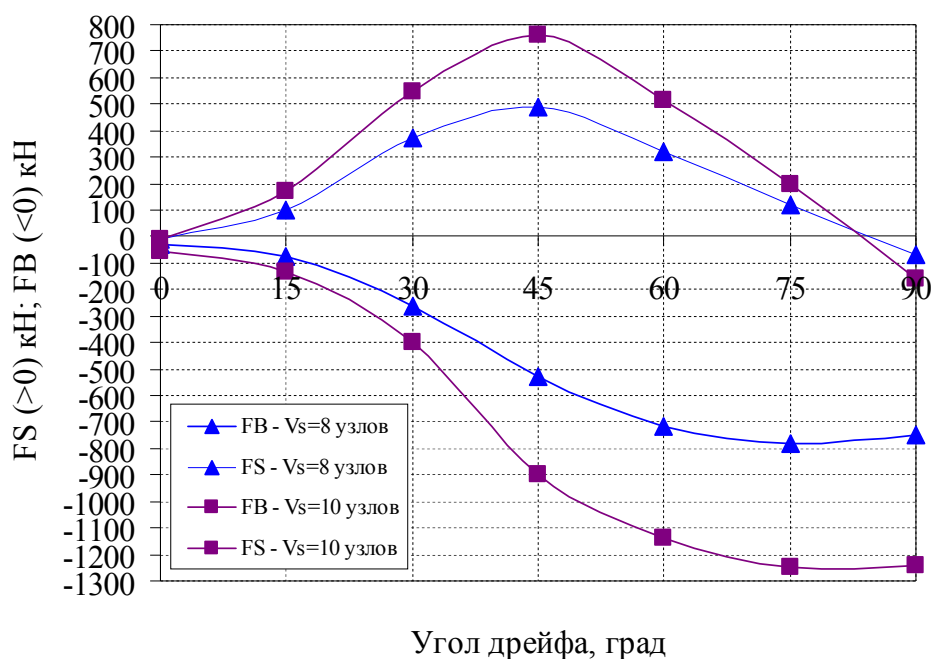


Рис. 7. Результаты пересчета сил на натуре

Таблица

Скорость	узлы	8	10
Максимальная управляющая сила FS (пересчет на натуре)	кН	490	740
Максимальная управляющая сила FS (натурные испытания)	кН	630	770

Обнаруживаемые расхождения при сравнении данных пересчета модельных испытаний на натуре с данными натурных испытаний, по-видимому, объясняются влиянием винто-рулевых колонок, которые отсутствовали при проведении модельных испытаний. При этом вероятной причиной расхождения результатов может быть изменение условий обтекания скегов модели и натуре потоком жидкости в отсутствии и при наличии винто-рулевых колонок. В условиях относительно малых скоростей хода с углом дрейфа одна из колонок может индуцировать повышенные скорости потока за скегом.

**Выводы.** Созданное оборудование для проведения модельных испытаний эскортных буксиров, способ определения действующих на модели сил и методика пересчета результатов модельных испытаний на натуру позволяют получить приемлемые результаты для предварительной оценки сил, действующих на буксир при проведении эскортных операций, которая инициируется требованиями классификационных обществ к процессу их аттестации.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Bureau Veritas, Rules for the Classification of Steel Ships, Chapter 14, Tugs.* – P.57-69.
2. *Технические требования к эскортным буксирам.* – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2008. – 11 с.
3. *Справочник по теории корабля: В 3-х т. – Т.3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / Под ред. Я.И. Войткунского.* – Л.: Судостроение, 1985. – 544 с.

*Стаття надійшла до редакції 21 вересня 2012 р.*