

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-15-25

УДК 532.526+629.543

EDN: ТВНMFQ

Г.И. Каневский^{ID}, С.А. Александров^{ID}
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ НА КРУПНОТОННАЖНОМ ТАНКЕРЕ «КРЫМ»

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются характеристики пограничного слоя в натуральных условиях на танкере «Крым». Цель работы – подготовка тестового примера для CFD-расчетов характеристик пограничного слоя в натуральных условиях на судах.

Материалы и методы. Изготовлена экспериментальная установка для определения характеристик течения в пограничном слое на танкере «Крым» в рамках натуральных испытаний.

Основные результаты. Проведены сравнительные модельные и натурные испытания. Получены результаты, позволяющие непосредственно оценить масштабный эффект характеристик пограничного слоя судна и проверить различные методы его расчета и моделирования. Подготовлена математическая модель геометрии танкера «Крым».

Заключение. Предлагаемые результаты натуральных испытаний могут быть использованы в качестве тестового примера при проведении CFD-расчетов характеристик пограничного слоя судна.

Ключевые слова: характеристики пограничного слоя, масштабный эффект, танкер, натуральный эксперимент.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

NAVAL ARCHITECTURE

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-15-25

UDC 532.526+629.543

EDN: ТВНMFQ

G.I. Kanevsky^{ID}, S.A. Aleksandrov^{ID}
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

FULL-SCALE BOUNDARY LAYER MEASUREMENT AT *KRYM* SUPERTANKER

Object and purpose of research. This paper discusses full-scale boundary layer parameters at *Krym* tanker. The purpose of the study was to prepare a test example for CFD calculations of boundary layer for real ships.

Materials and methods. The study was performed on a specially manufactured test rig for determination of boundary layer properties at *Krym* tanker as part of full-scale trials.

Main results. Comparison of model test results with actual measurement data made it possible to directly estimate boundary layer effect, as well as to verify different methods of its calculation and simulation, and also prepare the mathematical model of *Krym* tanker geometry.

Для цитирования: Каневский Г.И., Александров С.А. Определение характеристик пограничного слоя в натуральных условиях на крупнотоннажном танкере «Крым». Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 3(405): 15–25.

For citations: Kanevsky G.I., Aleksandrov S.A. Full-scale boundary layer measurement at *Krym* supertanker. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 3(405): 15–25 (in Russian).

Conclusion. The results of full-scale trials presented in this paper can be used as a test example in CFD calculations of boundary layer for ships.

Keywords: boundary layer properties, scale effect, tanker, full-scale experiment.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

В настоящее время в изучении проблемы пограничного слоя судна определяющее значение имеют систематические экспериментальные исследования (прежде всего сравнительные модельные и натурные испытания), позволяющие непосредственно оценить масштабный эффект характеристик пограничного слоя судна и проверить допущения приближенных методов его расчета и моделирования.

Практически отсутствуют сведения о характеристиках пограничного слоя крупнотоннажных судов при числах Рейнольдса, больших 10^9 , хотя уточнение способов моделирования вязкостных составляющих сопротивления и попутного потока таких объектов является одной из важнейших задач в проблеме ходкости.

Среди выполненных натурных испытаний наиболее полными можно считать опыты Аэртесе на [1, 2] на сухогрузном теплоходе «Лубумбаши». Сопоставление результатов натурального эксперимента и модельных исследований не только дает пред-

ставление о соотношении между распределением скоростей в сходственных точках корпуса модели и судне, но и позволяет проследить влияние на характеристики пограничного слоя изменения состояния поверхности обшивки корпуса в процессе эксплуатации судна.

Ряд материалов о пограничном слое корпуса в натуральных условиях получен также при испытании судов «Метеор» [3], «Врангель» в Швеции [4], «Люси Эштон» и «Оремина» [5, 6]. Опубликованы данные по произведенным в Японии опытам на танкере дедвейтом 160 000 т [7]. Измерения выполнены только в пристеночной зоне пограничного слоя в кормовой оконечности в районе 18 теоретического шпангоута при водоизмещении судна в полном грузу. Поэтому одной из целей настоящей работы являлось получение данных сравнительных модельных и натурных испытаний как в пристеночной, так и во внешней зоне пограничного слоя при числе Рейнольдса природы, превосходящем 10^9 .

Натурные испытания проводились на танкере «Крым» дедвейтом 150 000 т на Черном море. Геометрические характеристики натурального судна и мо-

Таблица 1. Геометрические характеристики натурального судна и модели танкера «Крым»

Table 1. Geometry of full-scale *Krym* tanker and its model

Характеристики	Судно	Модель
L_{pp} (м)	276,7	4,612
$L_{квл}$ (м)	284	4,733
B (м)	45	0,75
T (м)	17	0,283
$\delta_{квл}$	0,815	0,815
V (м ³)	177 066,0	0,820

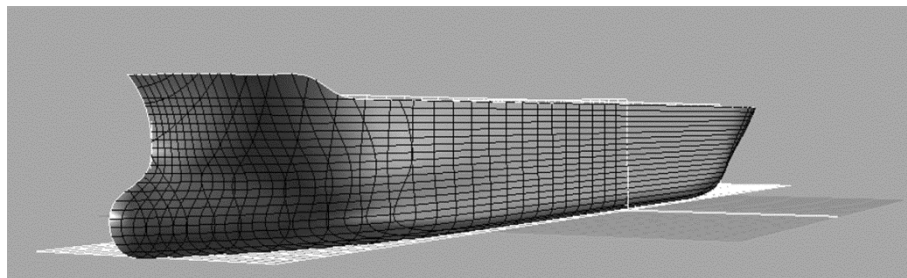


Рис. 1. Общий вид 3D-модели геометрии крупнотоннажного танкера «Крым»

Fig. 1. 3D model of *Krym* tanker: general view

дели, выполненной в масштабе 1:60, приводятся также в табл. 1.

На рис. 1 приведен общий вид разработанной 3D-модели геометрии крупнотоннажного танкера «Крым».

Описание экспериментальной установки для измерения характеристик пограничного слоя на крупнотоннажном танкере «Крым»

Test rig used for full-scale boundary layer measurements at *Krym* supertanker

Измерения проводились в точке, расположенной на расстоянии 8 м от основной плоскости на 78 практическом шпангоуте правого борта, т.е. на расстоянии 227 м в корму от носового перпендикуляра – в районе между 16 и 17 теоретическими шпангоутами. Подобный выбор определялся стремлением произвести замеры в зоне с развитой толщиной пограничного слоя ($\delta > 3$ м) и в то же время достаточно удаленной от гребного винта. Выбор ординаты точки замера примерно на половине осадки судна в полном грузу позволял получить некоторые удобства при монтаже приемных устройств, а также привести к не слишком сильному влиянию трехмерности течения на характеристики пограничного слоя.

Для измерений была выбрана наиболее простая и надежная методическая схема, при которой с помощью полнапорных трубок регистрировалась сумма статического давления и скоростного напора в различных точках поперечного сечения пограничного слоя. Статическое давление измерялось с помощью дренажного отверстия на корпусе. Дифференциальные датчики давления измеряли скоростной напор, с использованием которого в дальнейшем и было рассчитано распределение скоростей в пограничном слое.

Опытная установка «Выстрел» для замера характеристик пограничного слоя на танкере «Крым» включала следующие основные элементы:

- приемные устройства, воспринимающие давление;
- гидротрассы, соединяющие приемные устройства с блоком датчиков-преобразователей;
- блок датчиков-преобразователей, трансформирующий давление в электрический сигнал;
- электротрассы, соединяющие блок датчиков-преобразователей с регистрирующей аппаратурой;
- аппаратуру, регистрирующую измеряемые величины.

Принципиальная схема опытной установки представлена на рис. 2. Вся толщина пограничного слоя может быть условно разделена на две части: пристенную зону и внешнюю зону пограничного слоя. Пристенная зона пограничного слоя измеря-

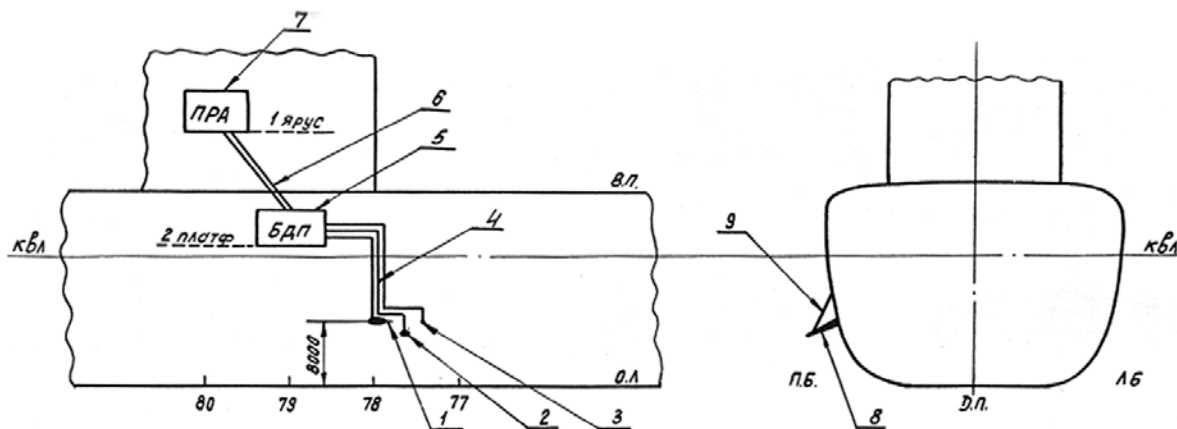


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для замера характеристик пограничного слоя: 1 – приемные полнапорные трубки; 2 – приемная трубка лага; 3 – приемник статического давления; 4 – гидротрассы; 5 – блок датчиков преобразователей; 6 – электротрассы; 7 – помещение регистрирующей аппаратуры; 8 – крыловой выстрел; 9 – профилированная штанга для фиксации крылового выстрела

Fig. 2. Test rig for boundary layer measurements: 1 – receiving tubes (total pressure); 2 – receiving tube (log); 3 – static pressure receiver; 4 – hydraulic lines; 5 – transducer assembly; 6 – electric lines; 7 – instrumentation room; 8 – wing boom; 9 – profiled rod for wing boom fixation

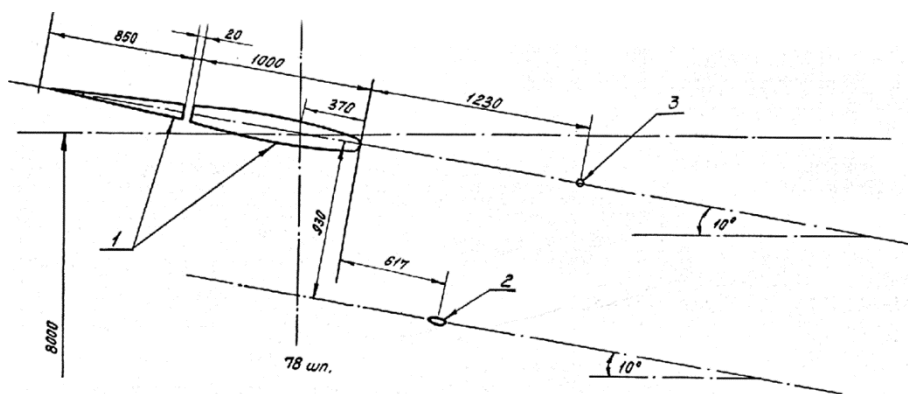


Рис. 3. Схема взаимного расположения приемных устройств на борту судна:
 1 – крыловой выстрел и его обтекатель;
 2 – приемная трубка лага;
 3 – приемник статического давления

Fig. 3. Arrangement of reception hardware aboard the ship:
 1 – wing boom and its fairing;
 2 – receiving tube (log);
 3 – static pressure receiver

лась с помощью выдвигающейся трубки лага ЛГ-2, что позволило с малым шагом подробно замерить ее характеристики, вплоть до расстояния 0,6 м от стенки.

Распределение скоростей во внешней зоне течения измерялось с помощью полнапорных трубок, закрепленных на державке в форме крылового выстрела, что позволило произвести измерения скорости на расстоянии до 5 м от поверхности корпуса. Крыловой выстрел и трубка лага установлены по нормали к поверхности наружной обшивки корпуса, причем диаметральной плоскостью их поперечных сечений повернута на угол 10° по отношению к основной плоскости. Угол 10° выбран так, чтобы направление хорды сечений крыла и трубки совпа-

дало с направлением линий тока потенциального потока вне пограничного слоя.

Схема взаимного расположения приемных устройств установки для замера характеристик пограничного слоя на борту судна представлена на рис. 3.

Схема расположения приемных полнапорных трубок на крыловом выстреле приводится на рис. 4.

В связи с тем, что показания полнапорного отверстия приемной трубки лага подвержены влиянию углов скоса, приемник статического давления на трубке был срезан под углом 45° , а затем произведена тарировка приемной трубки лага в опытовом бассейне.

Фотография общего вида приемных устройств установки для замера профиля скоростей в погра-

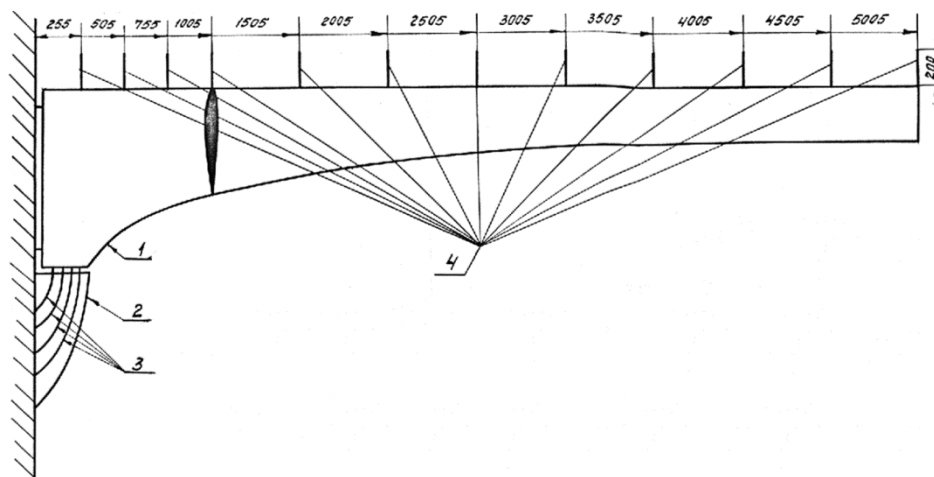


Рис. 4. Схема расположения приемных полнапорных трубок на крыловом выстреле:
 1 – крыловой выстрел; 2 – обтекатель крылового выстрела; 3 – гибкие шланги, соединяющие гидротрассы крылового выстрела и гидротрассы внутри корпуса судна; 4 – приемные полнапорные трубки

Fig. 4. Arrangement of total-pressure tubes on the wing boom:
 1 – wing boom; 2 – wing boom fairing; 3 – flexible hoses connecting hydraulic lines inside the hull and the wing boom;
 4 – total-pressure tubes

ничном слое приводится на рис. 5. Общий вид блока датчиков преобразователей представлен на рис. 6.

В процессе испытаний в опытовом бассейне профиль скорости в пограничном слое в сходственной точке модели измерялся с помощью гребенки из четырех полнонапорных трубок, закрепленных на координатнике, который позволял перемещать гребенку по направлению нормали к поверхности корпуса модели. Плоскость гребенки, как и в случае измерений в натуральных условиях, развернута под углом 10° к основной плоскости модели.

Результаты натурных измерений и их сопоставление с модельными данными

Full-scale results and their comparison with simulation data

В соответствии с принятой методикой испытаний в процессе измерений показания приемника статического давления сравнивались с показаниями 12 полнонапорных трубок, закрепленных на крыловом выстреле, а также с показаниями приемника полного напора и срезанной трубки лага. С этой целью в блоке датчиков-преобразователей была собрана гидравлическая схема для 15 датчиков. В связи с тем, что при движении судна в полном грузу датчики располагались на высоте примерно 2 м над уровнем моря, осуществлялась прокачка сначала гидротрасс, а затем датчиков.

Измерения характеристик натурального пограничного слоя проводилось во время установившегося режима движения судна на прямом курсе продолжительностью 1,5 ч со скоростью хода $V_S = 14,6$ уз. Ниже приводятся параметры, характеризующие режим движения судна, а также состояние моря:

- Осадка $T_n = T_k = 17$ м;
- Показания ВУШ 6,5;
- Шаговое отношение гребного вала $H/D = 1,1$;
- Число оборотов гребного вала $n = 83$ об/мин;
- Скорость хода по прокладке $V_S = 14,6$ уз;
- Курс судна 180° ;
- Дальность ветра 3 балла;
- Балльность волнения 1 балл;
- Курсовой угол ветра 135° ;
- Курсовой угол волнения 135° ;
- Глубина моря 800–1000 м;
- Температура воды $t = 14$ °С;
- Плотность воды $\rho = 1008$ кг/м³.

В процессе измерений записывались показания всех 15 каналов регистрации. Выполнено 36 замеров при различных выдвиганиях трубки лага, пе-

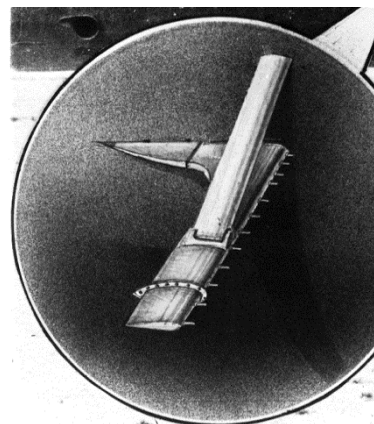


Рис. 5. Общий вид приемных устройств установки для замера профиля скоростей

Fig. 5. General view of test rig receptacles for speed profile measurements

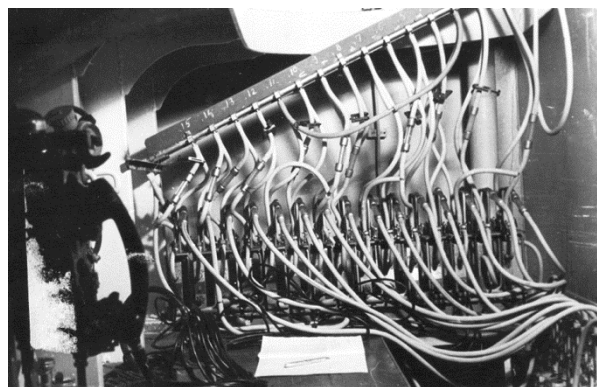


Рис. 6. Общий вид блока датчиков преобразователей

Fig. 6. Transducer assembly: general view

ремещаемой с шагом 25 мм. Время регистрации каждого замера принято равным 40 с. По результатам измерений выполнялся расчет распределения скоростей в пограничном слое судна.

Мгновенная скорость движения судна u_∞ определялась по показаниям полнонапорных трубок крылового выстрела, находящихся за внешней границей пограничного слоя, из условия $u_\delta/u_\infty = 1,075$, полученного по результатам модельных испытаний, где u_δ – скорость на внешней границе пограничного слоя. Средняя скорость движения судна на режиме измерений характеристик пограничного слоя, определенная по показаниям пяти наиболее удаленных трубок, составляла 14,62 уз, т.е. практически совпала с данными, полученными по прокладке.

В процессе испытаний замеры распределения скоростей во внешней зоне пограничного слоя многократно дублировались, что позволило применить методы математической обработки для анализа выполненных измерений. Результаты обработки приводятся в табл. 2.

Для анализа полученных данных рассчитывались интегральные характеристики пограничного слоя. При этом толщина пограничного слоя определялась по ординате пересечения функции

$$f(y) = \sqrt[3]{\left(1 - \frac{u}{u_\delta}\right)^2} \text{ с осью } y.$$

Толщина вытеснения δ^* и толщина потери импульса δ^{**} определялись непосредственным интегрированием с помощью соотношений

$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{u_\delta}\right) dy,$$

$$\delta^{**} = \int_0^\delta \frac{u}{u_\delta} \left(1 - \frac{u}{u_\delta}\right) dy.$$

Для определения трения поверхности корпуса использованы данные измерений в пристенной

области, выполненные с помощью трубки лага (табл. 3).

Для определения коэффициента поверхностного трения использована аппроксимация профиля скорости во внутренней зоне пограничного слоя логарифмической функции

$$\frac{u}{u_\delta} = \alpha \lg y + b.$$

Коэффициенты a и b в приведенной формуле определялись с помощью обработки экспериментальных данных по методу наименьших квадратов (рис. 7)

С учетом универсального логарифмического профиля скорости в турбулентном пограничном слое коэффициент α связан с безразмерной динамической скоростью $\omega = u_\tau / u_\delta$ соотношением

$$\omega = (\alpha \times \varkappa) / \ln 10,$$

где $\varkappa = 0,4$ – универсальная константа турбулентности, u_τ – динамическая скорость.

Тогда местный коэффициент поверхностного трения C_f может быть рассчитан по формуле $C_f = 2\omega^2$.

Таблица 2. Результаты замеров распределения скоростей во внешней зоне пограничного слоя

Table 2. Speed profile in the outer zone of the boundary layer: measurement results

$$v = 1,61 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, u_\tau = 0,21 \text{ м/с}, u_\infty = 7,53 \text{ м/с}$$

$y, \text{ м}$	$u, \text{ м/с}$	u/u_τ	u/u_∞	$\lg(y \cdot u_\tau / v)$
0,255	5,64	26,86	0,749	4,522
0,505	6,24	29,71	0,829	4,819
0,755	6,63	31,57	0,880	4,993
1,005	6,85	32,62	0,910	5,118
1,505	7,16	34,10	0,951	5,293
2,005	7,55	35,95	1,003	5,418
2,505	7,79	37,10	1,034	5,514
3,005	8,00	38,10	1,063	5,593
3,505	8,05	38,33	1,069	5,660
4,005	8,10	38,57	1,076	5,718
4,505	8,10	38,57	1,076	5,769
5,005	8,08	38,48	1,073	5,815

Построенный в универсальных координатах $\frac{u}{u_\tau} = f \cdot \left(\lg \frac{yu_\tau}{\nu} \right)$ профиль скорости в пограничном слое судна приводится на рис. 8.

Аппроксимация линейной области логарифмическим профилем скорости

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{yu_\tau}{\nu} + B(Kr)$$

Таблица 3. Результаты замеров распределения скоростей в пристенной зоне пограничного слоя

Table 3. Speed profile in the inner zone of the boundary layer: measurement results

$\nu = 1,61 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $u_\tau = 0,21 \text{ м/с}$, $u_\infty = 7,53 \text{ м/с}$, $u_\delta = 1,075 \cdot u_\infty = 8,095 \text{ м/с}$

$y, \text{ м}$	$u, \text{ м/с}$	$\lg y$	u/u_δ	u/u_τ	$\lg(y \cdot u_\tau / \nu)$	u/u_∞
0,011	3,82	-1,96	0,472	18,19	3,157	0,507
0,036	4,31	-1,44	0,532	20,52	3,672	0,572
0,061	4,58	-1,21	0,566	21,81	3,901	0,608
0,086	4,67	-1,065	0,577	22,24	4,050	0,620
0,111	5,00	-0,954	0,617	23,81	4,161	0,664
0,136	5,11	-0,866	0,631	24,23	4,249	0,679
0,167	5,13	-0,793	0,634	24,43	4,322	0,681
0,186	5,33	-0,739	0,658	25,38	4,385	0,708
0,211	5,4	-0,676	0,667	25,71	4,440	0,717
0,236	5,44	-0,627	0,672	25,90	4,488	0,722
0,261	5,56	-0,583	0,687	26,48	4,532	0,738
0,286	5,7	-0,544	0,704	27,14	4,572	0,757
0,311	5,75	-0,507	0,710	27,38	4,608	0,764
0,336	5,85	-0,474	0,723	27,85	4,642	0,777
0,361	6,02	-0,442	0,744	28,67	4,673	0,799
0,386	5,97	-0,413	0,737	28,43	4,701	0,793
0,411	6,12	-0,386	0,756	29,14	4,729	0,813
0,436	6,12	-0,360	0,756	29,14	4,755	0,813
0,461	6,14	-0,336	0,758	29,24	4,779	0,815
0,486	6,18	-0,313	0,763	29,43	4,802	0,821
0,511	6,28	-0,291	0,776	29,90	4,824	0,834
0,536	6,32	-0,271	0,781	30,10	4,845	0,839
0,561	6,3	-0,251	0,778	30,00	4,864	0,837
0,586	6,45	-0,232	0,797	30,71	4,883	0,857
0,611	6,42	-0,214	0,793	30,57	4,901	0,853

позволяет определить величину $B(Kr)$, равную в данном случае $-0,5$. Для турбулентного пограничного слоя на гладкой поверхности величина $B(0)$ является универсальной и может быть принята равной $5,2$. Отклонение величины $B(Kr)$ от его величины на гладкой поверхности связано с наличием шероховатости поверхности обшивки судна. Определенная по данным Ротта [8] высота бугорков эквивалентной песочной шероховатости с учетом

реализующихся в данном случае величин u , и $B(Kr)$ составляет $Kr \approx 200$ мк.

Для определения величины формпараметра Коулса Π или $K_0 = 2\Pi/\alpha$ использована формула для аппроксимаций профиля скорости в турбулентном пограничном слое логарифмическим профилем с добавкой Коулса

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{yu_\tau}{\nu} + \frac{\Pi}{\alpha} \left(1 - \cos \pi \frac{y}{\delta} \right) + B(Kr).$$

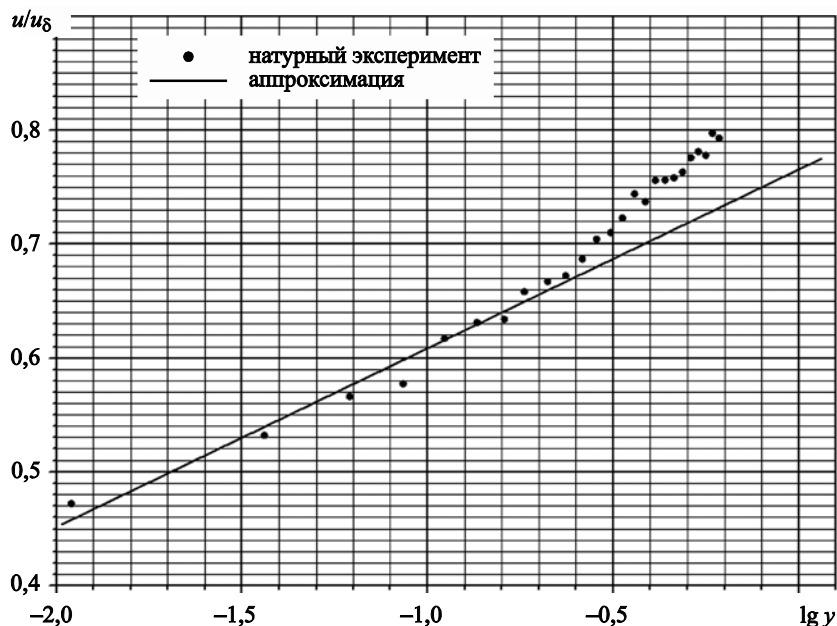


Рис. 7. Аппроксимация логарифмической зоны пристенной области пограничного слоя

Fig. 7. Inner zone of the boundary layer: approximation of the logarithmic domain

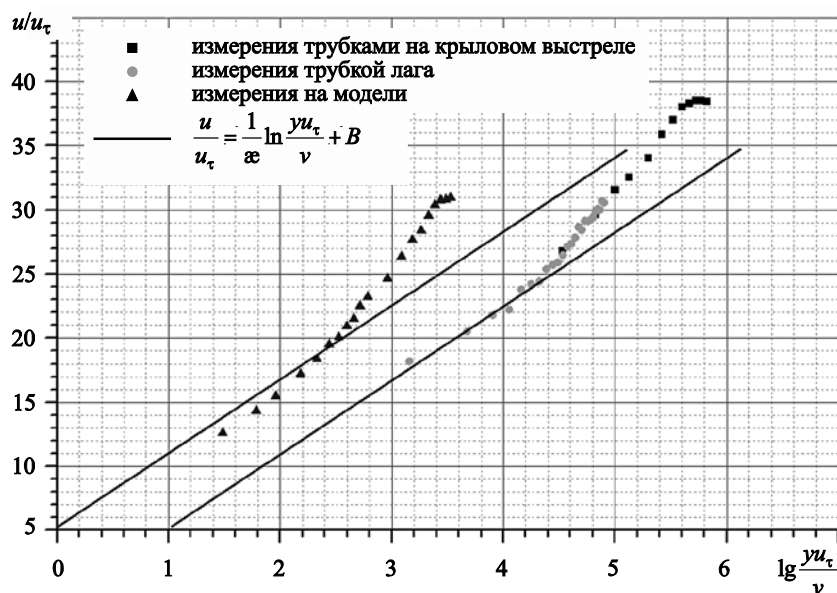


Рис. 8. Профиль скорости в пограничном слое в универсальных координатах

Fig. 8. Speed profile in the boundary layer (universal coordinates)

Тогда

$$K_0 = \frac{1}{\omega} - \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\delta u_\tau}{\nu} - B(Kr) = 6,3.$$

Для оценки влияния масштабного эффекта на характеристики пограничного слоя выполнены замеры характеристик пограничного слоя на модели судна, изготовленной в масштабе М1:60. Измерения проводились при скорости буксировки модели, равной 1,11 м/с и при загрузке по осадку, соответствующую полному грузу.

Замеры, проводимые как при работающем гребном винте, так и без него, показали отсутствие влияния работы винта на характеристики погра-

ничного слоя в точке замеров. Результаты модельных испытаний в виде зависимости u от y представлены в табл. 4 и на рис. 9.

Обработка результатов модельных испытаний с целью определения интегральных характеристик выполнялась по той же схеме, что и обработка результатов натурных испытаний. Исключение составляет способ определения значения местного коэффициента поверхностного трения C_f , который рассчитывался по методу Клайна [9] с использованием зависимости

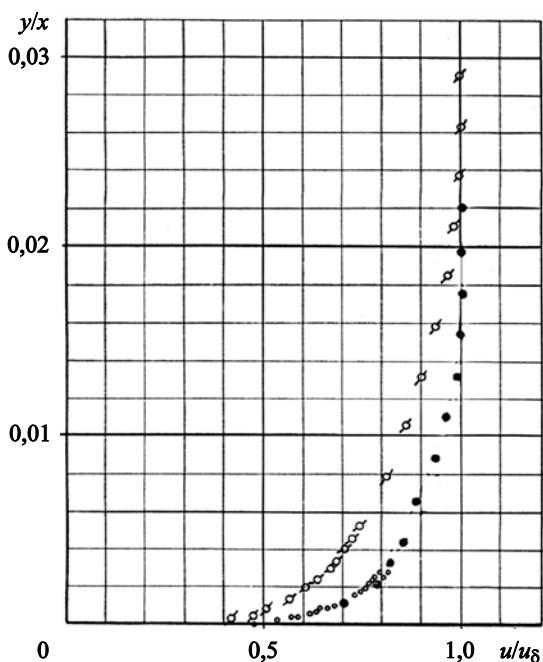
$$\frac{u}{u_\tau} = f \frac{yu}{\nu},$$

Таблица 4. Результаты измерений распределения скоростей в модельных условиях

Table 4. Model test data for speed distribution

$$\nu = 1,27 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \quad u_\tau = 0,0387 \text{ м/с} \quad u_\infty = 1,11 \text{ м/с} \quad u_\delta = 1,193 \text{ м/с}$$

№ п/п	$y, \text{ м}$	u/u_∞	$u, \text{ м/с}$	u/u_τ	$\lg(y \cdot u_\tau / \nu)$
1	0,001	0,440	0,488	12,61	1,484
2	0,002	0,500	0,555	14,34	1,785
3	0,003	0,540	0,599	15,48	1,961
4	0,005	0,600	0,666	17,21	2,183
5	0,007	0,640	0,710	18,35	2,329
6	0,009	0,680	0,755	19,51	2,438
7	0,011	0,700	0,777	20,07	2,525
8	0,013	0,730	0,810	20,93	2,298
9	0,015	0,759	0,833	21,52	2,660
10	0,017	0,785	0,871	22,51	2,714
11	0,020	0,810	0,899	23,23	2,785
12	0,030	0,860	0,955	24,68	2,961
13	0,040	0,920	1,021	26,38	3,086
14	0,050	0,9565	1,071	27,67	3,183
15	0,060	0,990	1,099	28,40	3,262
16	0,070	1,030	1,143	29,53	3,329
17	0,080	1,060	1,177	30,41	3,387
18	0,090	1,070	1,188	30,79	3,438
19	0,100	1,075	1,193	30,83	3,484
20	0,110	1,089	1,199	30,98	3,525



○ измерения на модели
 ● измерения трубками на крыловом выстреле
 ○ измерения трубкой лага } судно

Рис. 9. Распределение скоростей в пограничном слое модели и судна

Fig. 9. Speed profile in the boundary layer: model vs full scale – plot

рассчитанной с помощью логарифмического профиля скорости при $B = 5,2$ и $\alpha = 0,4$.

Построенный в универсальных координатах $\frac{u}{u_\tau} = f\left(\lg \frac{yu_\tau}{\nu}\right)$ профиль скорости в пограничном слое модели судна сопоставляется с данными натуральных испытаний на рис. 8.

Результаты обработки натурального и модельного профиля скоростей в пограничном слое приводятся в табл. 5.

Приведенные данные свидетельствуют о наличии существенного масштабного эффекта, который приводит к изменению безразмерных характерных толщин пограничного слоя в 1,5–2 раза при переходе от модели к натуре.

Заклучение

Conclusion

В настоящей статье приводятся результаты сопоставительного модельного и натурального эксперимента по замеру характеристик пограничного слоя на крупнотоннажном танкере «Крым». Полученные результаты натуральных испытаний можно использовать в качестве тестового примера в работах по математическому моделированию и при проведении CFD расчетов характеристик пограничного слоя судна.

Таблица 5. Сопоставление и натурального и модельного профиля скоростей в пограничном слое

Table 5. Speed profile in the boundary layer: model vs full scale – tabular data

	Модель	Натура		Модель	Натура
u_∞ , м/с	1,11	7,53	δ^{**} , м	0,0103	0,322
u_δ , м/с	1,193	8,095	δ^{**}/L	0,00217	0,00113
L , м	4,733	284	δ^{**}/x	0,00272	0,00141
ν , м ² /с	$1,27 \cdot 10^{-6}$	$1,61 \cdot 10^{-6}$	ω	0,0326	0,0260
\bar{x}	0,80	0,80	u_τ , м/с	0,0387	0,21
Re_L	$3,34 \cdot 10^{-6}$	$1,33 \cdot 10^{-6}$	C_f	0,00212	0,00134
Re_x	$2,65 \cdot 10^{-6}$	$1,06 \cdot 10^{-6}$	H	1,44	1,29
δ , м	0,095	3,78	K_0	6,3	6,3
δ/L	0,0201	0,0133	Π	1,26	1,26
δ/x	0,0251	0,0166	α	0,4	0,4
δ^* , м	0,0148	0,416	B	5,2	-0,5
δ^*/L	0,00313	0,00147	K_τ , мкм	≈ 0	≈ 200
δ^*/x	0,00391	0,00183			

Список использованной литературы

1. *Aertssen G.* Sea trials on a 9500 ton deadweight motor cargo liner // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. 1955. Vol. 97. P. 5 (p. 1–40).
2. *Aertssen G.* Further Sea Trials on the Lubumbaschi // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. 1957. Vol. 99. P. 502–530.
3. Meteor-Meßfahrten 1967 / *S. Schuster, H. Grothues-Spork, H. Thieme* [et al.] // Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. Berlin : Springer, 1969. B. 62. S. 159–204.
4. *Nordstrom H.F.* Full scale tests with the Wrangel and comparative model tests / Statens skeppsprovninganstalt (Swedish State Shipbuilding Experimental Tank). Göteborg, 1953. 91 p. (Meddelanden från Statens skeppsprovninganstalt ; № 27).
5. *Conn J.F.C., Lackenby H., Walker W.P.* BSRA Resistance experiments on the Lucy Ashton. Pt. II: The ship-model correlation for the Naked Hull Conditions // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. 1953. Vol. 95. P. 350–436.
6. *Cutland R.S.* Velocity Measurements in Close Proximity to a Ship's Hull // Transactions of the North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders. 1958. Vol. 74. P. 341–356.
7. *Taniguchi K., Fujita T.* Comparison of Velocity Distribution in the Boundary Layer between Ship and Model // Journal of the Society of Naval Architects of Japan. 1970. Vol. 127. P. 13–21.
8. *Ротта И.К.* Турбулентный пограничный слой в несжимаемой жидкости / Пер. с англ. *И.Д. Желтухина и Н.А. Сергиевского* ; Под ред. к.т.н. *Ю.Ф. Иванюты*. Ленинград : Судостроение, 1967. 232 с.
9. Структура турбулентных пограничных слоев // *С. Кляйн, У. Рейнольдс, Ф. Шрауб, П. Ранстэдлер* // Механика : периодический сборник переводов иностранных статей. Москва : Мир, 1969. № 4. С. 41–78.
4. *Nordstrom H.F.* Full scale tests with the Wrangel and comparative model tests / Statens skeppsprovninganstalt (Swedish State Shipbuilding Experimental Tank). Göteborg, 1953. 91 p. (Meddelanden från Statens skeppsprovninganstalt ; № 27).
5. *Conn J.F.C., Lackenby H., Walker W.P.* BSRA Resistance experiments on the Lucy Ashton. Pt. II: The ship-model correlation for the Naked Hull Conditions // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. 1953. Vol. 95. P. 350–436.
6. *Cutland R.S.* Velocity Measurements in Close Proximity to a Ship's Hull // Transactions of the North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders. 1958. Vol. 74. P. 341–356.
7. *Taniguchi K., Fujita T.* Comparison of Velocity Distribution in the Boundary Layer between Ship and Model // Journal of the Society of Naval Architects of Japan. 1970. Vol. 127. P. 13–21.
8. *Rotta J.C.* Turbulent Boundary Layers in Incompressible Fluids / Russian translation by *I.D. Zheltukhin and N.A. Sergievsky* ; Under editorship of *Yu.F. Ivanyuta*, Cand. Sci. (Eng.). Leningrad : Sudostroyeniye, 1967. 232 p.
9. Structure of turbulent boundary layers (*Russian translation*) / *S. Kline, W. Reynolds, F. Schraub, P. Rans-taedler* // Mechanics: Periodical Digest of Translated Papers. Moscow : Mir, 1969. No. 4. P. 41–78.

References

1. *Aertssen G.* Sea trials on a 9500 ton deadweight motor cargo liner // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. 1955. Vol. 97. P. 5 (p. 1–40).
2. *Aertssen G.* Further Sea Trials on the Lubumbaschi // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. 1957. Vol. 99. P. 502–530.
3. Meteor-Meßfahrten 1967 / *S. Schuster, H. Grothues-Spork, H. Thieme* [et al.] // Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. Berlin : Springer, 1969. B. 62. S. 159–204.

Сведения об авторах

Каневский Григорий Ильич, д.т.н., руководитель проектов ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-91. E-mail: gikanev@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3445-4575>.

Александров Станислав Анатольевич, к.т.н., научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-91. E-mail: 2_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2528-3070>.

About the authors

Grigory I. Kanevsky, Dr. Sci. (Eng.), Project Manager, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-91. E-mail: gikanev@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3445-4575>.

Stanislav A. Aleksandrov, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-91. E-mail: 2_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2528-3070>.

Поступила / Received: 22.03.23
Принята в печать / Accepted: 24.08.23
© Каневский Г.И., Александров С.А., 2023