

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-99-106  
УДК 629.5.018.712:629.585

*Памяти профессора А.А. Русецкого (1926–2022),  
книги которого стали надежным рабочим  
инструментом для меня и моих коллег –  
инженеров-гидромехаников*

М.А. Соколов  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК ПЕРЕСЧЕТА РЕЗУЛЬТАТОВ БУКСИРОВОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛЕЙ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК НА НАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ

**Объект и цель научной работы.** Объектом исследования являются результаты пересчета буксировочных испытаний в подводном положении моделей подводных лодок (ПЛ) на натурные условия (натурные размеры) ПЛ по двум разным методикам. Цель работы – сравнение указанных результатов.

**Материалы и методы.** Используются результаты испытаний моделей ПЛ и подводных аппаратов (ПА), проведенных в глубоководном опытовом бассейне Крыловского центра в соответствии с методикой [1], а также методики пересчета результатов буксировочных модельных испытаний на натурные условия, изложенные в [2, 4]. Результаты испытаний пересчитываются на натурные условия по двум методикам, и полученные расчеты буксировочного сопротивления корпусов ПЛ сравниваются между собой.

**Основные результаты.** Показано, что различие между полученными результатами незначительно и соизмеримо с принятой допустимой погрешностью. Высказаны предположения о причинах расхождения результатов.

**Закключение.** Несмотря на незначительные различия в методиках проведения буксировочных испытаний, изложенных в [1, 4], результаты пересчета на натурные условия по методикам, изложенным в [2, 4], совпадают, что косвенно подтверждает достоверность получаемых результатов и справедливость используемых допущений.

**Ключевые слова:** подводная лодка, буксировочное сопротивление, модельные испытания, пересчет на натурные условия.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-99-106  
UDC 629.5.018.712:629.585

M.A. Sokolov  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## COMPARISON OF EXTRAPOLATION PROCEDURES FOR SUBMARINE TOWING TEST DATA

**Object and purpose of research.** This paper discusses towing test data extrapolation for submarines (in submerged conditions) as per two different procedures to compare the results.

**Materials and methods.** The study relied on model test data for submarines and submersibles available with Krylov State Research Centre Deepwater Test Tank and performed as per Procedure [1], and on towing test data extrapolation results obtained as per References [2, 4]. Test results are extrapolated to the full-scale as per two procedures, with subsequent comparison of towing resistance values for model hull.

*Для цитирования:* Соколов М.А. Сравнение методик пересчета результатов буксировочных испытаний моделей подводных лодок на натурные условия. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 1(403): 99–106.

*For citations:* Sokolov M.A. Comparison of extrapolation procedures for submarine towing test data. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 1(403): 99–106 (in Russian).

**Main results.** The paper demonstrates that the deviation between the two procedures is insignificant and commensurable with acceptable measurement error, with discussion on possible reasons for this deviation.

**Conclusion.** Despite minor deviations in towing test procedures described in [1, 4], full-scale extrapolations obtained as per References [2, 4] coincide, which indirectly confirms reliability of the results and correctness of the assumptions.

**Keywords:** submarine, towing resistance, model tests, full-scale extrapolation.

*The author declares no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Буксировочные испытания – самый старый вид модельного эксперимента, с которого начиналась экспериментальная гидромеханика. Именно буксировочные испытания проводил Уильям Фруд в первом опытовом бассейне, построенном в Англии в 1872 г. Сегодня, 150 лет спустя, в перечне МКОБ<sup>1</sup> числится около 60 глубоководных опытовых бассейнов (ГОБ) разного размера. Для этих ГОБ буксировочные испытания по-прежнему остаются одним из основных видов испытаний.

Задачей буксировочных испытаний является прогноз зависимости буксировочного сопротивления корпуса проектируемого корабля от скорости движения. Задача делится на два этапа: проведение испытаний модели и пересчет результатов испытаний на натурные условия. Методики испытаний и пересчета для надводных кораблей описаны в рекомендациях МКОБ [5], их положений придерживаются в большинстве опытовых бассейнов.

Отметим, что методики испытаний моделей подводных лодок и надводных кораблей не одинаковы. Кроме того, общепринятых методик в мире не существует: в разных странах они могут сильно отличаться друг от друга. Соответственно, отличаются и методики пересчета полученных результатов модельного эксперимента на натурные условия (натурные размеры) ПЛ. Критерием правильности выбранных методик проведения испытаний и пересчета является совпадение результатов прогноза и натурных испытаний.

Оценить, насколько достоверны различные методики, затруднительно, поскольку, по понятным причинам, результаты как модельных, так и натурных испытаний в открытой печати не публикуются. Сами методики в открытой печати также встречаются очень редко.

В 2013 г. в Крыловском центре была издана книга доктора гидродинамики А. Бовиса (Франция)

«Морская гидродинамика. Подводная лодка» в переводе профессора А.А. Русецкого. В книге описывается методика буксировочных испытаний модели подводной лодки и пересчета полученных результатов на натурные условия, которые предлагаются Высшей национальной школой передовых технологий<sup>2</sup> (Франция).

В данной статье проводится сравнение методик испытаний ПЛ и методик пересчета буксировочных испытаний модели ПЛ на натурные условия, предлагаемых ENSTA, и тех, которые используются в Крыловском центре. Далее в тексте они называются французской и русской методиками.

## Сравнение методик буксировочных испытаний

### Comparison of towing test procedures

Гидродинамическое сопротивление подводной лодки при движении на большой глубине состоит из сопротивления трения и сопротивления формы и имеет волновую составляющую.

Исходя из этого для обеспечения подобия обтекания натурной ПЛ и модели необходимо обеспечить равенство чисел Рейнольдса для модели ( $Re_M$ ) и натурной ПЛ ( $Re_S$ ). Применительно к модели, изготовленной в линейном масштабе 1:20 (обычно выбирается близкий к этому значению масштаб модели), выполнение указанного требования достигается при скоростях движения модели 150–300 м/с. Для реализации таких скоростей потребуется опытовый бассейн длиной 10–15 км. Кроме того, при испытаниях невозможно заглубить модель настолько, чтобы исключить волновую составляющую гидродинамического сопротивления.

Рассмотрим, как решаются эти проблемы в России и во Франции.

По методике [1], применяемой в Крыловском центре, в процессе испытаний измеряются скорость движения модели  $V$  (м/с) и сопротивление воды движению корпуса модели  $R(H)$ . Полученные ре-

<sup>1</sup> Международная конференция опытовых бассейнов. Оригинальное название ИТТС – International Towing Tank Conference (официальный сайт [www.ittc.info](http://www.ittc.info)).

<sup>2</sup> ENSTA ParisTech – École Nationale Supérieure de Techniques Avancées (фр.).

зультаты представляют в виде безразмерных коэффициентов:

- коэффициент полного сопротивления:

$$C = \frac{R}{\frac{\rho V^2}{2} \Omega};$$

- коэффициент трения (рассчитывается по формуле Прандтля – Шлихтинга):

$$C_{FM} = \frac{0,455}{(\lg Re_M)^{2,58}};$$

- коэффициент остаточного сопротивления:

$$C_{RM} = C - C_{FM};$$

- коэффициент аффинности:

$$\alpha = \frac{C_{RM}}{C_{FM}}.$$

В формуле коэффициента полного сопротивления в качестве параметра обезразмеривания используется  $\Omega$  – площадь смоченной поверхности модели без выступающих частей («голового корпуса»);  $\rho$  – плотность воды в опытовом бассейне.

Модель испытывается в положении палубой вниз, что снижает влияние свободной поверхности воды на результаты испытаний.

Испытания подводных моделей проводятся на скоростях движения модели, соответствующих диапазону чисел Фруда  $0,4 < Fr < 1,2$ . Для анализа используется участок кривой в диапазоне  $1,0 < Fr < 1,2$ . В этом диапазоне чисел Фруда при заглублинии модели не менее  $1/4$  от ее длины волновое сопротивление пренебрежимо мало. Одновременно с этим в указанном диапазоне скоростей (если длина модели не менее 4 м) обеспечивается условие  $Re > Re_{кр}$  (где  $Re_{кр} = 2 \cdot 10^7$ ).

При этом достигаются естественная турбулизация пограничного слоя на корпусе модели и автоматичность коэффициента остаточного сопротивления относительно числа  $Re$ . Одновременно наступает автоматичность коэффициента остаточного сопротивления относительно числа  $Fr$ , что приводит к образованию на графике  $C_R = f(Fr)$  выраженной горизонтальной площадки. Величина  $C_R$ , соответствующая указанной площадке, считается результатом, полученным в данном эксперименте.

Проводится минимум два эксперимента. В первом эксперименте модель испытывается в полном вооружении (ПВ), во втором – с модели снимаются все выступающие части (ограждение выдвигаемых

устройств, кормовые стабилизаторы, носовые или рубочные рули и т.д.) и она испытывается в варианте «голый корпус» (ГК). Разность между остаточными сопротивлениями, полученными в этих опытах,  $C_A = C_{R(ПВ)} - C_{R(ГК)}$ , считается коэффициентом сопротивления выступающих частей.

Французская методика испытаний подводных моделей описывается А. Бовисом [3] достаточно кратко. По приведенным иллюстрациям (рис. VI.17 [4] и рис. VI.18 [4]) можно предположить, что модель также испытывается в положении палубой вниз и испытания проводятся в диапазоне чисел Фруда  $0,4 < Fr < 1,2$ .

В процессе испытаний измеряются скорость движения модели  $V$  и сопротивление воды движению корпуса модели  $R$ . Из полученного сопротивления вычитаются две поправки:

- 1) на волновое сопротивление (способ определения данной поправки не приводится);
- 2) на гидродинамическое взаимодействие между корпусом модели и системой ее крепления к буксировочной тележке (является характеристикой конкретного экспериментального стенда и определяется опытным путем).

По полученному результату определяется коэффициент полного сопротивления модели  $C_{XM}$ , аналогично коэффициенту  $C$  в методике, применяемой в Крыловском центре.

Рассчитывается коэффициент остаточного сопротивления по формуле:

$$C_{XR} = C_{XM} - C_f(Re_M) \cdot (1+k),$$

где  $C_f(Re_M)$  – коэффициент трения, рассчитанный по формуле ИТТС(1957):

$$C_f = \frac{0,075}{(\lg Re - 2)^2};$$

$(1+k)$  – это фактор формы, рассчитываемый по формуле S.F. Hoerner для хорошо обтекаемых тел:

$$(1+k) = 1 + 1,5 \left( \frac{D}{L} \right)^{3/2} + 7 \left( \frac{D}{L} \right)^3,$$

где  $D/L$  – отношение ширины корпуса к его длине, одинаково для модели и для ПЛ.

Испытания проводятся только в варианте полного вооружения.

Сравнивая две методики, следует отметить, что методики собственно проведения испытаний очень похожи. В обоих случаях модель испытывается палубой вниз и при больших числах  $Fr$ . Можно

предположить, что во французской методике модель также испытывается в условиях естественной турбулизации пограничного слоя на корпусе. По крайней мере, никаких упоминаний о средствах искусственной турбулизации (турбулизаторах) в тексте нет.

Есть три существенных различия, относящихся к методике обработки полученных результатов:

- 1) Во французском методе вводятся поправки на волновое сопротивление и на гидродинамическое взаимодействие между корпусом модели и системой крепления. При проведении испытаний в Крыловском центре в подавляющем большинстве случаев этими поправками пренебрегают, поскольку поправка на волновое сопротивление мала и является ошибкой в безопасную сторону, а система крепления имеет хорошо обтекаемую форму, малое поперечное сечение и практически не влияет на обтекание модели.
- 2) Метод расчета остаточного сопротивления.
- 3) Отсутствие во французском методе выделения коэффициента сопротивления выступающих частей. Он входит в общий коэффициент остаточного сопротивления. При этом коэффициент полного сопротивления, в отличие от отечественной методики, рассчитывается по полной площади смоченной поверхности модели (с учетом площади выступающих частей).

## Сравнение методик пересчета полученных результатов модельного эксперимента на натурные условия

Comparison of extrapolation procedures for model test data

Методика пересчета результатов модельного эксперимента на натурные условия напрямую зависит от методики проведения испытаний и способа расчета безразмерных коэффициентов.

В России для расчета коэффициента полного сопротивления корпуса ПЛ по результатам модельного эксперимента используется формула из [2], входящие в нее немоделируемые коэффициенты берутся из [3]:

$$C_{Ts} = (1 + \alpha) \cdot C_{Fs} + C_A + C_{As} + C_{Hs},$$

где  $C_{Ts}$  – коэффициент полного сопротивления ПЛ;  $C_{Fs}$  – коэффициент сопротивления трения ПЛ по Прандлю – Шлихтингу;  $C_A$  – коэффициент полного

сопротивления выступающих частей;  $C_{As}$  – коэффициент сопротивления, обусловленного общей и местной шероховатостью ПЛ;  $C_{Hs}$  – коэффициент сопротивления, обусловленного наличием вырезов в корпусе ПЛ.

В книге А. Бовиса [4] для расчета коэффициента полного сопротивления корпуса ПЛ по результатам модельного эксперимента рекомендуется формула:

$$C_{XS} = C_{XM} - (1 + k) [C_f(\text{Re}_M) - C_f(\text{Re}_S)] + \delta C_f(\text{Re}_S) (1 + k),$$

где  $C_f(\text{Re}_S)$  – коэффициент трения (рассчитанный по формуле ИТТС(1957));  $\delta C_f(\text{Re}_S)$  – дополнительный член, учитывающий мелкие неоднородности и отверстия на корпусе, невозпроизводимые на модели.

Для корпусов ПЛ, находящихся в хорошем состоянии, рекомендуется принимать  $\delta C_f(\text{Re}_S) = 0,5 \cdot 10^{-3}$ .

В обеих приведенных формулах для расчета коэффициента полного сопротивления ПЛ присутствует надбавка, связанная с немоделируемыми в процессе эксперимента элементами корпуса: мелкими неоднородностями (шероховатость) и отверстиями (вырезы). Указанные коэффициенты  $\delta C_f(\text{Re}_S)$  (во французской формуле) и  $C_{As} + C_{Hs}$  (в отечественной) описывают одинаковые физические процессы и имеют близкие значения для типичных корпусов ПЛ. Для «идеальной» ПЛ с гладким корпусом, без вырезов, указанные формулы приобретают вид:

$$C_{Ts} = (1 + \alpha) \cdot C_{Fs} + C_A \text{ (Россия);}$$

$$C_{XS} = C_{XM} - (1 + k) [C_f(\text{Re}_M) - C_f(\text{Re}_S)] \text{ (Франция).}$$

Эти формулы можно преобразовать к виду, более наглядному для дальнейшего анализа:

$$C_{Ts} = \alpha \cdot C_{Fs} + C_{Fs} + C_A \text{ (Россия);}$$

$$C_{XS} = C_{XR} + (1 + k) \cdot C_f(\text{Re}_S) \text{ (Франция).}$$

В отечественной формуле  $\alpha \cdot C_{Fs}$  соответствует коэффициенту остаточного сопротивления формы «голового корпуса» ПЛ, пересчитанного из коэффициента остаточного сопротивления ГП модели пропорционально коэффициенту трения «голового корпуса» ПЛ. Коэффициент сопротивления выступающих частей используется без пересчета. Таким образом, коэффициент остаточного сопротивления ПЛ формируется в виде  $(\alpha \cdot C_{Fs} + C_A)$ . Для получения коэффициента полного сопротивления к нему добавляется коэффициент трения корпуса ПЛ.

Во французской формуле для получения коэффициента полного сопротивления ПЛ суммируются коэффициент остаточного сопротивления модели (в полном вооружении) и коэффициент трения корпуса ПЛ с поправкой на фактор формы.

Зависимость полного сопротивления ПЛ от скорости движения в обоих методах рассчитывается по стандартной формуле:

$$R(V) = C \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot \Omega,$$

где  $C$  – это коэффициент полного сопротивления корпуса ПЛ (для русского метода  $C = C_{Тз}$ , для французского  $C = C_{XS}$ );  $\Omega$  – площадь смоченной поверхности (для русского метода это площадь поверхности «голового корпуса», для французского – полная площадь поверхности корпуса, включая выступающие части).

## Сравнение результатов пересчета модельного эксперимента на натурные условия

Comparison of extrapolation results

Поскольку методики собственно проведения эксперимента – применяемая в Крыловском центре и рекомендуемая в книге А. Бовиса – основаны на одинаковом принципе (испытания при больших («заволно-

вых») числах Фруда), интересно сравнить методы обработки результатов испытаний и конечный результат пересчета на натурные условия при одинаковых исходных данных, полученных в экспериментах.

В качестве исходных данных будут использованы результаты испытаний (в безразмерном виде) различных моделей ПЛ и ПА, полученные в ГОБ Крыловского центра (табл. 1).

В табл. 1 приведены следующие данные:

$L_M$  – длина модели;

$B_M$  – ширина модели;

$\Omega_{M(ГК)}$  – площадь смоченной поверхности «голового корпуса» модели;

$C_{R(ГК)}$  – коэффициент остаточного сопротивления «голового корпуса» модели;

$C_{R(ПВ)}$  – коэффициент остаточного сопротивления модели в полном вооружении;

$C_{FМ}$  – коэффициент трения «голового корпуса» модели;

$C_A$  – коэффициент сопротивления выступающих частей.

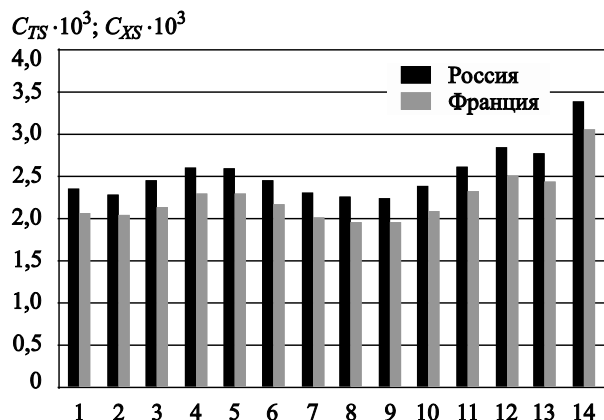
Значения взяты в зоне автомодельности коэффициентов остаточного сопротивления относительно чисел  $Fr$  и  $Re$ , при  $Fr \approx 1,1$ .

По приведенным результатам рассчитаем коэффициенты полного сопротивления серии «идеальных» ПЛ (т.е. без учета составляющих сопротивления, не моделируемых в процессе эксперимента). Предположим, что все модели были изготовлены

**Таблица 1.** Результаты испытаний моделей подводных лодок и подводных аппаратов

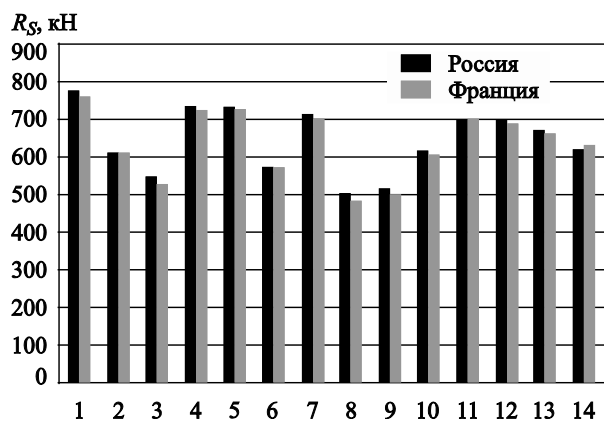
**Table 1.** Model test data for submarines and submersibles

№	$L_M$	$B_M$	$L/B$	$\Omega_{M(ГК)}$	$C_{R(ГК)} \cdot 10^3$	$C_{R(ПВ)} \cdot 10^3$	$C_{FМ} \cdot 10^3$	$C_A \cdot 10^3$
1	6,370	0,503	12,664	9,985	0,270	0,930	2,333	0,660
2	5,546	0,486	11,412	8,112	0,410	0,890	2,405	0,480
3	4,933	0,433	11,393	6,733	0,220	0,980	2,468	0,760
4	5,560	0,503	11,054	8,520	0,350	1,190	2,403	0,840
5	5,560	0,503	11,054	8,520	0,350	1,200	2,403	0,850
6	5,192	0,479	10,839	7,115	0,388	1,041	2,440	0,653
7	5,554	0,531	10,460	9,379	0,320	0,875	2,404	0,555
8	4,870	0,483	10,083	6,687	0,300	0,800	2,475	0,500
9	4,846	0,483	10,033	6,972	0,345	0,795	2,230	0,450
10	4,864	0,544	8,941	7,832	0,345	0,950	2,476	0,605
11	4,957	0,580	8,547	8,093	0,500	1,240	2,465	0,740
12	4,771	0,579	8,240	7,450	0,410	1,430	2,486	1,020
13	4,724	0,607	7,783	7,314	0,520	1,390	2,492	0,870
14	3,320	0,750	4,427	5,573	1,200	2,220	2,699	1,020



**Рис. 1.** Сравнение коэффициентов полного сопротивления «идеальных» подводных лодок, рассчитанных по методам, применяемым в России и во Франции

**Fig. 1.** Comparison of total resistance coefficients for “perfect” submarines calculated as per the methods adopted in Russia and France



**Рис. 2.** Сравнение сопротивлений «идеальных» подводных лодок на скорости 25 уз, рассчитанных по методам, применяемым в России и во Франции

**Fig. 2.** Comparison of resistances for “perfect” submarines at 25 knots calculated as per the methods adopted in Russia and France

в одном типовом масштабе 1:20 (на самом деле это не так, но для сравнения результатов обработки и пересчета такое допущение возможно). Скорость движения ПЛ будет задана равной 25 уз.

Расчеты будут выполнены для следующих условий:

- температура пресной воды в ГОБ – 18 °С;
- плотность пресной воды в ГОБ – 1000 кг/м<sup>3</sup>;
- кинематическая вязкость пресной воды – 1,054 · 10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/с;

- температура морской воды – 15 °С;
- плотность морской воды – 1026 кг/м<sup>3</sup>;
- кинематическая вязкость морской воды – 1,187 · 10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/с.

При выполнении расчетов следует учесть, что во французском методе используется не площадь смоченной поверхности «голового корпуса», а полная площадь смоченной поверхности. Поскольку информация по площади смоченной поверхности выступающих частей отсутствует, по имеющимся статистическим данным было выбрано среднее значение указанной площади для всех моделей – 12 % от площади «голового корпуса». Исходя из этого был пересчитан коэффициент остаточного сопротивления модели в полном вооружении при расчете по французскому методу. Результаты расчетов приведены на гистограмме на рис. 1.

На гистограмме приведены результаты расчетов для 14 моделей из табл. 1, где модели упорядочены по удлинению корпуса ( $L/B$ ), от большего к меньшему. Номера моделей приведены на оси X. Результаты, полученные по российскому методу пересчета, в среднем на 13 % выше, чем те, что получены по французскому методу. Это близко к разнице площадей смоченной поверхности «голового корпуса» ПЛ, используемого в отечественном расчете, и корпуса в полном вооружении, используемого в расчете по французскому методу.

Для более корректного сравнения рассчитаем полное буксировочное сопротивление указанных «идеальных» ПЛ на скорости 25 уз. Результат расчета приводится на гистограмме (рис. 2).

Буксировочное сопротивление на рис. 2 приводится в килоньютонах, номера моделей соответствуют табл. 1 и рис. 1. Линейные размеры моделей пересчитаны на натурные размеры пропорционально коэффициенту масштаба. Площади смоченной поверхности пересчитывались пропорционально квадрату коэффициента масштаба. На гистограмме, приведенной на рис. 2, среднее значение разности между сопротивлениями, сосчитанными по разным методикам, составляет около 1 %. Только для 4 объектов из 14 представленных указанная разность превышает 2 %. Причиной расхождения могут быть допущения, принятые в данном расчете. В большинстве случаев отечественный метод дает более высокое сопротивление, что является ошибкой (если это ошибка) в безопасную сторону.

Для одной из моделей из табл. 1, для которой имелись данные по размерам натурной ПЛ, площади выступающих частей и надбавкам на шероховатость и вырезы (для расчета по российской методи-

ке), был выполнен полный расчет сопротивления воды движению корпуса ПЛ для реального объекта. Результат расчета приводится на рис. 3.

Сопротивление на графике на рис. 3 приводится в килоньютонах, скорость – в узлах. Расчет выполнен для всего диапазона возможных скоростей движения. В указанном диапазоне скоростей наблюдается хорошее совпадение результатов. Среднее расхождение составляет ~1,5 %.

Обычно одной из конечных целей комплекса модельных экспериментов, в состав которых входят буксировочные испытания, является определение скорости хода ПЛ. Построив зависимость, обратную приведенной на рис. 3 (рис. 4), можно оценить разницу определения скорости при заданном сопротивлении при пересчете по разным методикам.

Относительная разница в определении скорости по разным методикам пересчета во всем ее диапазоне практически постоянна и составляет 0,8 %. Данная погрешность сопротивления укладывается в стандартные требования, предъявляемые к точности определения скорости хода ПЛ.

## Заключение

### Conclusion

В рамках работы выполнены расчеты сопротивления серии «идеальных» ПЛ по большой выборке результатов модельных испытаний. Расчеты проводились по двум разным методикам, изложенным в [1, 2]. В качестве исходных данных использовалась выборка, представленная моделями разных размеров, в широком диапазоне удлинений.

Сравнивались методика испытаний и пересчета на натурные условия, описанная в книге доктора гидродинамики А. Бовиса (Франция) «Морская гидродинамика. Подводная лодка» в переводе профессора А.А. Русецкого, и аналогичные методики, используемые в отечественной практике.

Методики проведения испытаний оказались достаточно близкими. Разница заключается, прежде всего, в способе обработки полученных результатов. Это позволило сравнивать методы пересчета результатов испытаний на натурные условия, основываясь на результатах испытаний, полученных в ГОБ Крыловского центра.

По результатам сравнения методов пересчетов можно заключить, что оба рассмотренных метода дают близкие результаты. Разница в определении скорости хода (для типичного корпуса) укладывается в допустимую погрешность.

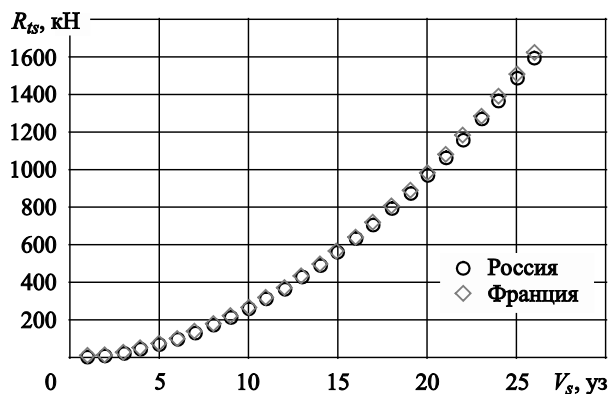


Рис. 3. Графики зависимости полного сопротивления подводной лодки от скорости хода, рассчитанные по методам, применяемым в России и во Франции

Fig. 3. Plots of total resistance versus speed calculated as per the methods adopted in Russia and France

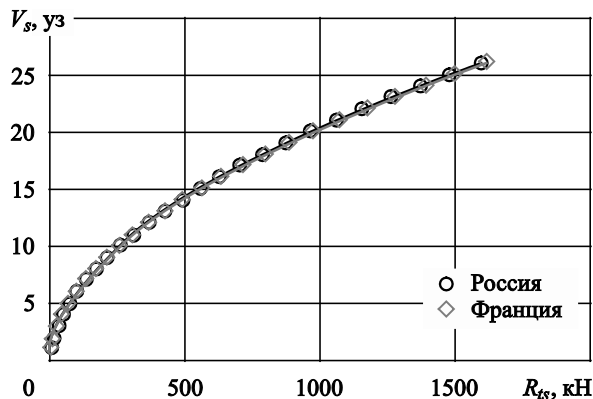


Рис. 4. Графики зависимости скорости хода от полного сопротивления подводной лодки, рассчитанные по методам, применяемым в России и во Франции

Fig. 4. Plots of speed versus total resistance calculated as per the methods adopted in Russia and France

Совпадение результатов пересчетов на натурные условия, выполненных по разным методикам, косвенно подтверждает достоверность используемых методик и получаемых результатов. Подобный способ косвенной оценки достоверности результатов имеет большое значение, поскольку единственный прямой способ проверки – проведение буксировочных испытаний натурального корпуса ПЛ – практически невозможен.

## Список использованной литературы

1. Методика измерений при проведении буксировочных испытаний погруженных моделей в опыто-

- вом бассейне института / Центральный научно-исследовательский институт им. академика А.Н. Крылова; утверждено д.т.н., проф. И.А. Титов, Ленинград, 1984. 19 с. № ГР 029/2-84. Вып. 30277.
2. *Войткунский Я.И.* Сопротивление движению судов. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Судостроение, 1988. 286, [1] с.
  3. РДВ5.0153-73. Расчет сопротивления движению изделий 21 в начальной стадии проектирования. Ленинград, 1973.
  4. *Бовис А.* Морская гидродинамика. Подводная лодка: монография / Пер. с фр. А.А. Русецкого. Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2013. 218 с.
  5. ИТТС: Recommended Procedures and Guidelines: 7.5-02-02-01. Resistance Test: Rev. 03 / Ed. 26<sup>th</sup> ИТТС Resistance Committee. [S. l.]: ИТТС, 2011. 13 p.
  3. Resistance calculation for submarines at early design stages. Standard OST V5.0153-73. RDV5.0153-73. Resistance calculation for Article 21 at early design stage. Leningrad, 1973 (*in Russian*).
  4. *Bovis A.* Hydrodynamique navale: Le sous-marin / Russian translation by A.A. *Rusetsky*. St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2013. 218 p.
  5. ИТТС: Recommended Procedures and Guidelines: 7.5-02-02-01. Resistance Test: Rev. 03 / Ed. 26<sup>th</sup> ИТТС Resistance Committee. [S. l.]: ИТТС, 2011. 13 p.

## References

1. Towing test procedure for submerged models / Krylov Central Research Institute. Leningrad, 1984. No. GR-029/2-84. Vol. 30277 (*in Russian*).
2. *Voitkunsky Ya.I.* Ship resistance. 2<sup>nd</sup> edition, rev. and enl. Leningrad: Sudostroyeniye, 1988. 286 p. (*in Russian*).

---

## Сведения об авторе

*Соколов Марат Александрович*, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-77. E-mail: mr.Sokolov.M.A@yandex.ru.

## About the author

*Marat A. Sokolov*, Head of Sector, Krylov State Research Centre, St. Petersburg. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-77. E-mail: mr.Sokolov.M.A@yandex.ru.

Поступила / Received: 11.08.22  
Принята в печать / Accepted: 07.02.23  
© Соколов М.А., 2023