

Г.И. Каневский, А.М. Клубничкин, М.П. Лобачев, А.А. Рудниченко  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПАСА ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ЛЕДОКОЛОВ НА РАЗВИТУЮ КАВИТАЦИЮ

**Объект и цель научной работы.** Объектом научной работы являются гребные винты ледоколов. Цель работы – разработка методики определения запаса гребного винта ледокола на развитую кавитацию.

**Материалы и методы.** Для разработки методики определения запаса гребного винта ледокола на развитую кавитацию используется метод проведения физического эксперимента в кавитационной трубе и в кавитационном бассейне.

**Основные результаты.** Предложен числовой показатель, характеризующий устойчивость гребного винта против развитой кавитации. Предложена схема, позволяющая объединить результаты испытаний в кавитационной трубе и кавитационном бассейне. Продемонстрирована целесообразность проектирования гребных винтов на работу при начальном этапе развитой кавитации.

**Заключение.** В заключение научной работы можно отметить необходимость проведения испытаний модели гребного винта и в кавитационной трубе и в кавитационном бассейне для получения достоверной оценки запаса на развитую кавитацию применительно к гребным винтам ледокола.

**Ключевые слова:** гребные винты ледоколов, развитая кавитация, кавитационная труба, кавитационный бассейн.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Лобачев М.П., Рудниченко А.А. Разработка методики определения запаса гребных винтов ледоколов на развитую кавитацию. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 2(384): 49–60.

УДК 629.5.015.2:5312.528

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-49-60

G. Kanevsky, A. Klubnichkin, M. Lobachev, A. Rudnichenko  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## DEVELOPING THE PROCEDURE FOR DETERMINATION OF SECOND-STAGE CAVITATION MARGIN FOR ICEBREAKER PROPELLERS

**Object and purpose of research.** This paper studies icebreaker propellers. The purpose of this work is to develop the procedure for determination of intense-cavitation margin for icebreaker propellers.

**Materials and methods.** The procedure for determination of second-stage cavitation margin for icebreaker propellers is developed by means of physical experiment in the cavitation tunnel and in the cavitation tank.

**Main results.** The paper suggests a numerical parameter characterizing propeller resistance to second-stage cavitation, and also suggests a technique for uniting the test data obtained in the cavitation tunnel and in the cavitation tank. It was demonstrated that propellers are practicable to design for operation at the initial phase of second-stage cavitation.

**Conclusion.** The paper concludes that model tests of icebreaker propellers in the cavitation tunnel and in the cavitation test tank are necessary to obtain a reliable estimate for their second-stage cavitation margin.

**Key words:** icebreaker propellers, second-stage cavitation, cavitation tunnel, cavitation test tank.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Kanevsky G., Klubnichkin A., Lobachev M., Rudnichenko A. Developing the procedure for determination of second-stage cavitation margin for icebreaker propellers. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 2(384): 49–60 (in Russian).

UDC 629.5.015.2:5312.528

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-49-60

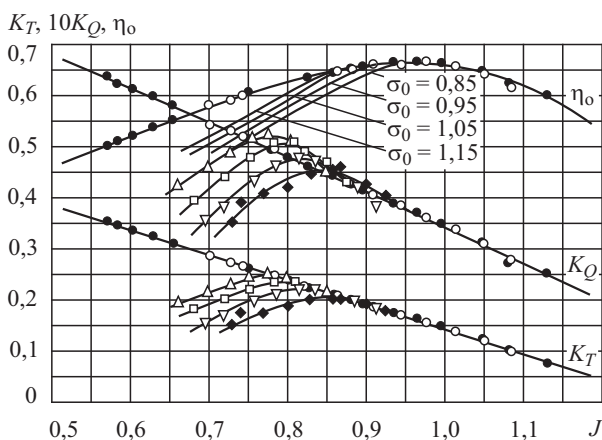


## Введение

### Introduction

При начальной стадии кавитации не происходит изменения гидродинамических характеристик гребных винтов (коэффициентов момента и упора). Эту стадию принято называть первой. Как правило, изменение безразмерных гидродинамических характеристик винта наблюдается лишь в том случае, когда кавитация охватывает практически всю засасывающую сторону лопасти; подобное развитие кавитации называют ее второй стадией [1]. В работе рассматриваются некоторые аспекты работы гребных винтов именно вблизи и в режиме развитой (второй) стадии кавитации.

Наиболее актуально рассмотрение этих режимов для гребных винтов ледоколов, которые перерабатывают полную мощность главных двигателей при скоростях хода 2–6 уз. При этом методы назначения необходимых запасов от «сваливания» во вторую стадию кавитации и, следовательно, неэффективной переработки мощности в настоящее время развиты недостаточно. В связи с этим разработка методики оценки рациональных запасов на развитую или вторую стадию кавитации представляется актуальной. Однако при движении кораблей полным ходом вопросы корректного назначения запасов на вторую стадию кавитации также актуальны, и в работе им будет уделено внимание. Так как рассмотрение второй стадии кавитации при движении полным ходом является более наглядным, то изложение основного материала начнем



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента упора  $K_T$  и коэффициента момента  $K_Q$  модели гребного винта  $A$

**Fig. 1.** Thrust coefficient  $K_T$  and torque coefficient  $K_Q$  of Propeller  $A$  model

именно с этого режима. Приведенные данные относятся только к гребным винтам фиксированного шага или гребным винтам регулируемого шага, работающим при постоянном значении шагового отношения.

## Определение начала второй стадии кавитации

### Definition of second-stage cavitation inception

Классическое определение начала развитой кавитации или второй стадии кавитации [2] базируется на результатах испытаний моделей гребных винтов в кавитационной трубе. На рис. 1 представлены типичные результаты испытания модели гребного винта  $A$  в кавитационной трубе. Основные геометрические характеристики гребного винта  $A$  приведены в табл. 1. Испытания выполнены при атмосферном давлении и при ряде значений числа кавитации определенного по скорости потока:

$$\sigma_0 = \frac{p - p_v}{(\rho/2) \cdot V^2}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление в месте расположения гребного винта,  $\text{Н/м}^2$ ;  $p_v$  – давление насыщенных паров воды,  $\text{Н/м}^2$ ;  $V$  – скорость потока в месте расположения гребного винта,  $\text{м/с}$ ;  $\rho$  – плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ .

Данные рис. 1 представляют собой зависимости коэффициента упора  $K_T$ , коэффициента момента  $K_Q$  и коэффициента полезного действия  $\eta_0$  от поступи  $J$ :

$$K_T = T/(\rho \cdot n^2 \cdot D^4), \quad K_Q = Q/(\rho \cdot n^2 \cdot D^5),$$

$$\eta_0 = J/(2\pi)(K_T/K_Q), \quad J = V/(nD),$$

где  $T$  – упор гребного винта,  $\text{Н}$ ;  $Q$  – момент на гребном винте,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  $n$  – частота вращения гребного винта,  $\text{об/с}$ .

**Таблица 1.** Основные геометрические характеристики гребного винта  $A$

**Table 1.** Main geometric parameters for Propeller  $A$

Характеристика	Значение
Диаметр, $D$ , мм	200
Число лопастей, $Z$	5
Шаговое отношение, $P/D$	1,233
Дисковое отношение, $A_E/A_o$	1,15

**Таблица 2.** Основные геометрические характеристики гребного винта *B*

**Table 2.** Main geometric parameters for Propeller *B*

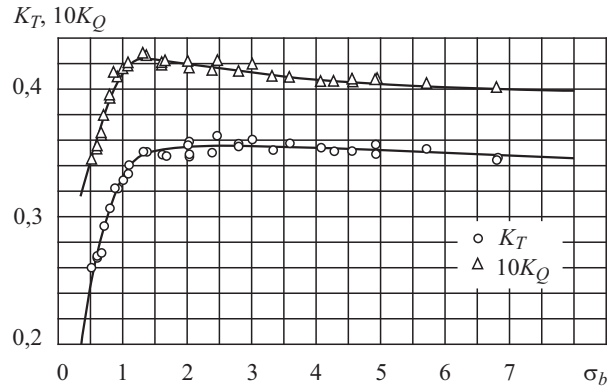
Характеристика	Значение
Диаметр, $D$ , мм	200
Число лопастей, $Z$	4
Шаговое отношение, $P/D$	0,757
Дисковое отношение, $A_E/A_o$	0,720

Рассматривая данные рис. 1, можно отметить, что при заданном числе кавитации  $\sigma_0$  экспериментальные точки при больших значениях поступи  $J$  совпадают с данными, полученными при атмосферном давлении. Затем, по мере уменьшения поступи  $J$ , экспериментальные точки перестают совпадать с данными, полученными при атмосферном давлении и «отваливаются» от них. Отвалы могут происходить сначала вверх, а затем вниз. Отвалы могут происходить сразу вниз. Работа гребного винта на отвале указывает на появление развитой кавитации или второй стадии кавитации. Таким образом, второй стадией кавитации называются кавитационные явления, при которых коэффициент упора  $K_T$  или коэффициент момента  $K_Q$  гребного винта отличаются от значений, полученных без кавитации. В качестве величины, характеризующей запас на вторую стадию кавитации, в данном случае принимают

$$\text{Marg} = \left( 1 - \frac{\sigma_{ocr}}{\sigma_{oreal}} \right), \quad (2)$$

где  $\sigma_{ocr}$  – число кавитации, при котором начинается «отвал» гидродинамических характеристик гребного винта от значений, полученных при атмосферном давлении для рабочей поступи;  $\sigma_{oreal}$  – число кавитации, соответствующее рабочему режиму гребного винта.

Для ледоколов наиболее опасным представляется режим переработки мощности на швартовах. Для анализа влияния кавитации на гидродинамические характеристики гребного винта, работающего на швартовах при скорости движения  $V_S = 0$ , использованы результаты испытаний в кавитационном бассейне гребного винта *B* с основными геометрическими характеристиками, представленными в табл. 2. На швартовах принято применять



**Рис. 2.** Результаты испытаний на швартовах в кавитационном бассейне. Модель гребного винта *B*

**Fig. 2.** Results of bollard-pull tests in the cavitation tank. Propeller *B* model

число кавитации по оборотам, определяемое соотношением

$$\sigma_b = \frac{p - p_v}{(\rho/2) \cdot n^2 \cdot D^2}. \quad (3)$$

На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов упора и момента от числа кавитации  $\sigma_b$ , полученные по результатам испытаний модели гребного винта *B* в кавитационном бассейне. В отличие от данных на рис. 1, здесь приведены зависимости, полученные при постоянном значении поступи  $J = 0$ . Видно, что с уменьшением числа кавитации  $\sigma_b$  коэффициенты упора и момента несколько увеличиваются. Коэффициент момента достигает максимума при значении  $\sigma_b = 1,5$ . Это значение числа кавитации часто принимают в качестве критического, за которым начинается вторая стадия кавитации. Действительно, при уменьшении числа кавитации ниже критического происходит резкое уменьшение коэффициентов упора и момента. В то же время здесь хорошо видна некоторая неопределенность в том, что считать началом второй стадии кавитации. Для коэффициентов упора и момента в данных испытаниях точки максимума не совпадают. Кроме того, возможно определение начала второй стадии как режима, при котором после достижения максимальных значений коэффициентов упора и момента падают до значений, соответствующих большим числам кавитации (или полученным при атмосферном давлении).

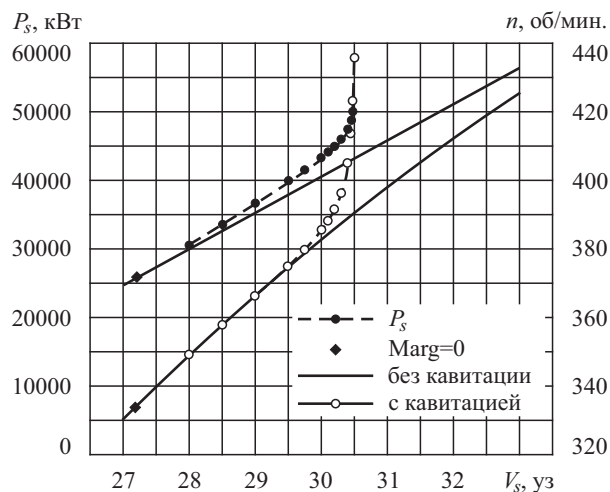
Ниже будет проведен анализ и предложена методика, позволяющая связать эксперименты в кавитационной трубе и кавитационном бассейне и несколько снизить имеющуюся неопределенность.

## Анализ работы гребных винтов на различных этапах второй стадии кавитации

Analysis of propeller operation at different phases of second-stage cavitation

Представленное сложное определение второй стадии кавитации вызывает необходимость подробно разобраться в происходящих явлениях. Наиболее удобно это сделать с использованием результатов расчета ходовых качеств гипотетического корабля, который по мере увеличения числа оборотов гребных винтов «вваливается» во вторую стадию кавитации [3]. Для того чтобы численно промоделировать влияние второй стадии кавитации, пришлось уменьшить диаметр гребных винтов реального корабля на 15%. Наряду с представлением гидродинамических характеристик гребных винтов в обычном, безразмерном виде целесообразно провести анализ изменения размерных величин. Хотя в [1] и приводятся такие данные (стр. 540), многие специалисты отождествляют вторую стадию кавитации с катастрофическим падением характеристик гребных винтов, забывая, что это верно для безразмерного представления данных величин, в то время как изменение размерных величин происходит достаточно плавно и наблюдается не падение, а выход на постоянные значения упора и момента.

На рис. 3 приведены зависимости потребной мощности  $P_S$  и частоты вращения гребных винтов  $n$



**Рис. 3.** Зависимость потребной мощности  $P_S$  и частоты вращения гребных винтов  $n$  от скорости хода корабля  $V_S$

**Fig. 3.** Shaft power  $P_S$  and propeller RPM  $n$  versus ship speed  $V_S$

от скорости хода корабля  $V_S$ . Сплошными линиями представлены результаты расчета без учета кавитации. Пунктирные линии получены с учетом влияния кавитации. Звездочкой отмечена точка начала работы гребных винтов во второй стадии кавитации. Видно, что при увеличении скорости хода на один уз с момента начала второй стадии кавитации представленные зависимости мало отклоняются от полученных без кавитации. Затем, по мере роста скорости хода, влияние кавитации увеличивается. Все заканчивается асимптотическим значением скорости хода  $V_S = 30,5$  уз. Любое увеличение числа оборотов и потребной мощности не позволяет получить скорость хода выше асимптотического значения. Совершенно очевидно, что движение со скоростью более  $V_S = 29,5$  уз является неэффективным и сопровождается неэффективной переработкой мощности главных двигателей. Можно отметить, что неэффективная переработка мощности главных двигателей начинается при больших отрицательных запасах по второй стадии кавитации  $Marg \ll 0$ .

Закачивая анализ данных рис. 3, можно отметить, что работа гребных винтов на начальном этапе второй стадии кавитации является допустимой. Внимательный анализ работы гребных винтов некоторых реальных кораблей показывает, что на полном ходу на начальном этапе второй стадии кавитации их движители работают с потерей эффективности, составляющей десятые доли процента. При этом, если проектировать гребной винт с учетом допустимости работы в таком режиме на полном ходу, заметно повышается эффективность работы движителей на малых ходах. Учитывая реальный спектр эксплуатации кораблей, в котором движение полным ходом составляет 1% жизни корабля, проектирование гребных винтов на работу на начальном этапе второй стадии кавитации на полном ходу представляется оптимальным.

На рис. 4 представлена зависимость упора гребного винта корабля  $T$  от частоты вращения гребных валов  $n$ . Видно, что при увеличении оборотов гребных валов  $n$  упор  $T$  сначала растет. Начиная с некоторого значения  $n$  упор  $T$  перестает расти и выходит на асимптотическое значение. Таким образом, заключительный этап второй стадии кавитации характеризуется постоянной величиной упора:  $T = \text{constant}$ .

На рис. 5 представлена зависимость момента на гребном винте корабля  $Q$  от частоты вращения гребных валов  $n$ . При увеличении оборотов гребных валов  $n$  момент  $Q$  сначала растет. На раннем этапе

второй стадии кавитации скорость роста момента  $Q$  превышает величину, характерную для отсутствия кавитации. Это явление связано с формой отвала коэффициента момента от зависимости без кавитации (рис. 1). Начиная с некоторого значения  $n$  момент  $Q$  перестает расти и выходит на асимптотическое значение. Таким образом, заключительный этап второй стадии кавитации характеризуется постоянной величиной момента  $Q$ :  $Q = \text{constant}$ .

На рис. 6 представлена зависимость потребной мощности от частоты вращения гребных валов  $n$ . При увеличении оборотов гребных валов  $n$  потребная мощность  $P_S$  всегда растет. На раннем этапе второй стадии кавитации скорость роста потребной мощности  $P_S$  превышает величину, характерную для отсутствия кавитации. Начиная с некоторого значения  $n$ , зависимость потребной мощности  $P_S$  начинает расти в линейной зависимости от оборотов  $n$ . Заключительный этап второй стадии кавитации характеризуется линейной зависимостью потребной мощности  $P_S$  от оборотов  $n$ :  $P_S = n \cdot \text{constant}$ .

Обсуждаемые явления можно наблюдать в кавитационной трубе при испытаниях моделей гребных винтов. Однако принятая форма представления (на основе анализа расчетов ходкости) является более наглядной.

Выше рассматривались явления, наблюдаемые на заключительном этапе второй стадии кавитации при произвольном значении асимптотической скорости корабля. Для ледоколов наиболее опасен режим переработки мощности на швартовах. На рис. 2 были показаны зависимости коэффициентов упора и момента от числа кавитации  $\sigma_b$ , полученные по результатам испытаний модели гребного винта  $B$  в кавитационном бассейне.

Представляется интересным поведение упора, момента и потребной мощности после начала работы гребного винта во второй стадии кавитации. На рис. 7 показана зависимость упора гребного винта  $T$  ледокола от числа оборотов гребного вала  $n$ . Без учета влияния кавитации эта зависимость является квадратичной параболой. С учетом влияния кавитации величина упора вначале возрастает примерно на 2%, но по мере углубления на второй стадии кавитации становится заметно меньше полученной без влияния кавитации.

На рис. 8 представлена зависимость момента на гребном винте ледокола  $Q$  от числа оборотов гребного вала  $n$ . Согласно приведенным на рисунке данным, влияние кавитации вначале приводит к увеличению момента примерно на 5%, а затем

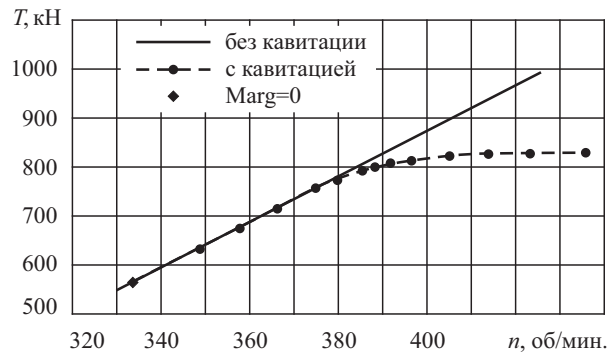


Рис. 4. Зависимость упора гребного винта корабля  $T$  от частоты вращения гребных валов  $n$

Fig. 4. Propeller thrust  $T$  versus shaft RPM  $n$

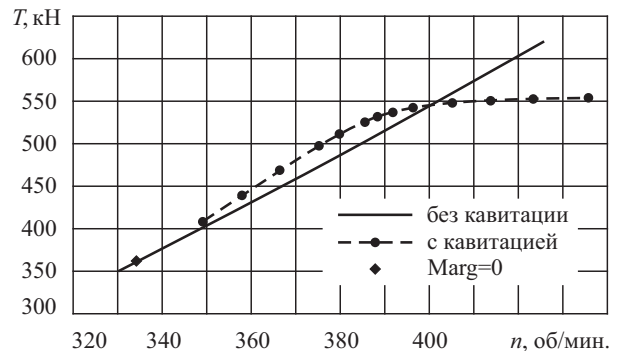


Рис. 5. Зависимость момента гребного винта корабля  $Q$  от частоты вращения гребных валов  $n$

Fig. 5. Propeller torque  $Q$  versus shaft RPM  $n$

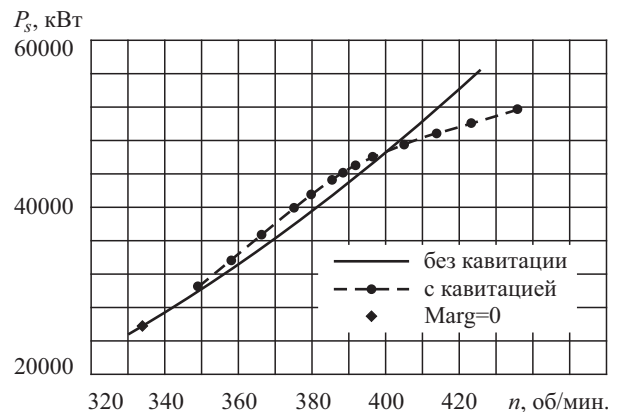
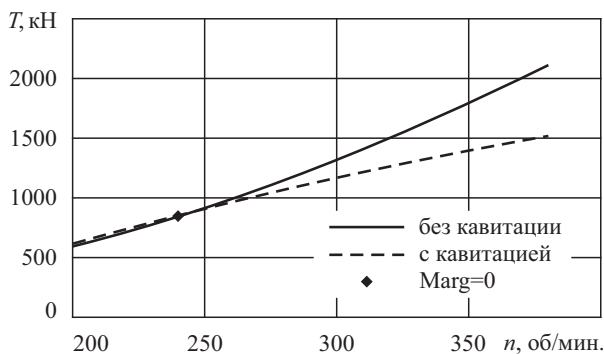


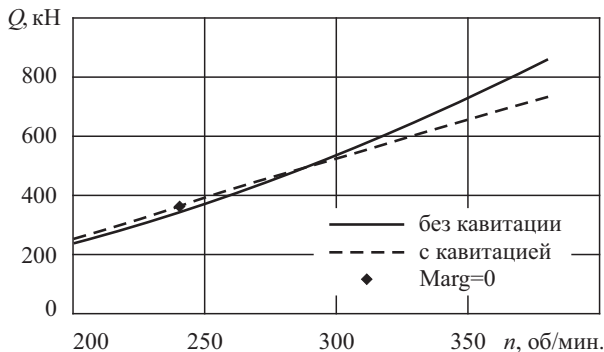
Рис. 6. Зависимость потребной мощности  $P_S$  от частоты вращения гребных винтов  $n$

Fig. 6. Shaft power  $P_S$  versus propeller RPM  $n$



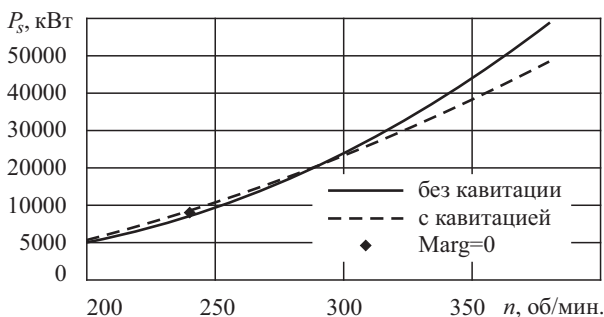
**Рис. 7.** Зависимость упора гребного винта ледокола  $T$  от частоты вращения гребного вала  $n$  на швартовах. Гребной винт  $B$  диаметром  $D = 3,5$  м

**Fig. 7.** Icebreaker propeller thrust  $T$  versus shaft RPM  $n$  at bollard pull. Propeller  $B$ , diameter  $D = 3.5$  m



**Рис. 8.** Зависимость момента на гребном винте ледокола  $Q$  от частоты вращения гребного вала  $n$  на швартовах. Гребной винт  $B$  диаметром  $D = 3,5$  м

**Fig. 8.** Icebreaker propeller torque  $Q$  versus shaft RPM  $n$  at bollard pull. Propeller  $B$ , diameter  $D = 3.5$  m



**Рис. 9.** Зависимость мощности потребляемой гребным винтом ледокола  $P_S$  от частоты вращения гребного вала  $n$  на швартовах. Гребной винт  $B$  диаметром  $D = 3,5$  м

**Fig. 9.** Icebreaker shaft power  $P_S$  versus shaft RPM  $n$  at bollard pull. Propeller  $B$ , diameter  $D = 3.5$  m

к заметному уменьшению момента по сравнению с данными, полученными без кавитации.

На рис. 9 приведена зависимость мощности, потребляемой гребным винтом ледокола  $T_S$ , от частоты вращения гребного вала  $n$  на швартовах. Анализ данных рис. 9 показывает, что при увеличении оборотов гребного вала  $n$  величина потребляемой мощности  $P_S$  постоянно растет и стремится к линейной зависимости от оборотов.

На рис. 10 приведена зависимость потери эффективности создания упора  $E$  от глубины погружения на второй стадии кавитации. Здесь  $E = K_T/K_Q^{2/3}(n)/2,93$ , причем  $K_T/K_Q^{2/3} = 2,93$  без кавитации. Согласно приведенным на рисунке данным, по мере погружения во вторую стадию кавитации эффективность создания упора падает, но вначале достаточно медленно. Это означает, что при работе гребного винта на швартовах, так же как и при движении полным ходом, допускается начальный этап второй стадии кавитации.

Естественно допустить, что скорость  $V_S = 0$  не является исключением и на швартовах при достаточно глубокой стадии кавитации выполняются соотношения

$$T = \text{constant при } V_S = 0;$$

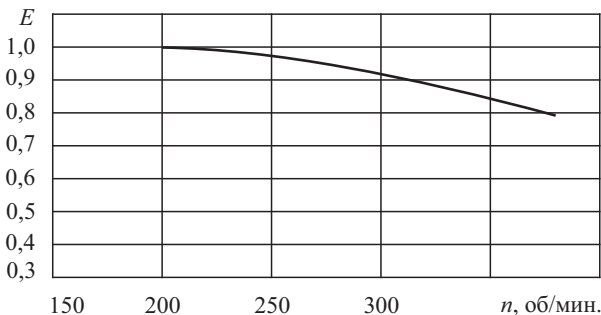
$$Q = \text{constant при } V_S = 0;$$

$$P_S = n \cdot \text{constant при } V_S = 0.$$

Если принять эти соотношения, то следуют формулы

$$K_T = \text{constant}/n^2 \text{ при } V_S = 0;$$

$$K_Q = \text{constant}/n^2 \text{ при } V_S = 0.$$



**Рис. 10.** Потеря эффективности создания упора  $E$  в зависимости от глубины погружения во вторую стадию кавитации на швартовах. Гребной винт  $B$  диаметром  $D = 3,5$  м

**Fig. 10.** Thrust deterioration  $E$  versus the phase of second-stage cavitation at bollard pull. Propeller  $B$ , diameter  $D = 3.5$  m



С учетом определения числа кавитации по оборотам  $\sigma_b$  (3) для заключительного этапа второй стадии кавитации на стопе можно получить

$$K_T = \text{constant} \cdot \sigma_b \text{ при } V_S = 0; \quad (4)$$

$$K_Q = \text{constant} \cdot \sigma_b \text{ при } V_S = 0. \quad (5)$$

Анализ формул (4) и (5) показывает, что для заключительного этапа второй стадии кавитации на стопе коэффициент упора  $K_T$  и коэффициент момента  $K_Q$  подчиняются линейной зависимости от  $\sigma_b$ , проходящей через ноль.

Анализ приведенных в данном разделе экспериментальных и расчетных данных показывает, что работа движителей на начальном этапе второй стадии кавитации является допустимой и целесообразной.

## Представление результатов экспериментальных исследований характеристик гребных винтов в кавитационной трубе

Test results obtained for propellers in the cavitation tunnel

Общепринятым [1] является построение результатов испытаний модели гребного винта в кавитационной трубе (рис. 11) в виде зависимости коэффициента нагрузки по упору  $C_T$  от произведения числа кавитации  $\sigma_o$  на дисковое отношение  $A_E/A_o$ :

$$C_T = \frac{T}{\frac{\rho V_a^2}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4}}. \quad (6)$$

Указанная зависимость является геометрическим местом экспериментальных точек, соответствующих при различных значениях числа кавитации  $\sigma_o$  отклонению (отвалу) зависимостей эффективности  $\eta_o$  или коэффициента упора  $K_T$  от линий, полученных в кавитационной трубе при атмосферном давлении.

При обработке данных испытаний в кавитационной трубе для определения коэффициента нагрузки по упору можно воспользоваться соотношением, которое следует из формулы (6):

$$C_T = K_T \cdot \frac{8}{\pi} \cdot \frac{1}{J^2}.$$

Несмотря на некоторую неопределенность в обработке данных эксперимента, получаемые экспериментальные точки обычно ложатся на прямую линию:

$$C_T = a + b \cdot (\sigma_o \cdot A_E / A_o). \quad (7)$$

При обработке данных эксперимента, по видимому, следует учитывать, что при давлении, равном  $p_v$ , т.е. при  $\sigma_o = 0$ , упор модели гребного винта без «отвалов» точек равен нулю. С учетом наличия дополнительной точки (0, 0) прямая линия (формула (7)) превращается в луч, проходящий через начало координат:

$$C_T = b \cdot (\sigma_o \cdot A_E / A_o), \quad a = 0. \quad (8)$$

При построении зависимости  $C_T = C_T(\sigma_o)$  учет дополнительной точки оказывается весьма полезным в связи с тем, что в эксперименте реально достижимый диапазон изменения параметра  $\sigma_o \cdot A_E / A_o$  оказывается довольно узким.

Некоторые специалисты подвергают сомнению прохождение луча  $C_T = C_T(\sigma_o)$  через начало координат. Однако это определяется фактически самой физикой процесса. Если быть абсолютно точным, то зависимость  $C_T = C_T(\sigma_o)$  проходит через точку, не совсем соответствующую нулевому значению  $C_T$ , но в практических приложениях ее можно считать именно нулевой. Как уже было указано выше, значению  $\sigma_o = 0$  соответствует давление, равное давлению насыщенного пара, т.е. все пространство при этом заполнено паром и мы имеем вращение гребного винта в атмосфере водяного пара. При представлении коэффициента  $C_T$  стандартным образом, с использованием плотности воды для условий проведения эксперимента, для случая  $\sigma_o = 0$  получим

$$C_T |_{\sigma_o=0} = C_T |_{\text{атм}} \cdot \frac{\rho_{\text{vap}}}{\rho_{\text{water}}},$$

где  $C_T |_{\text{атм}}$  – значение  $C_T$ , полученное при атмосферном давлении;  $\rho_{\text{vap}}$  – плотность насыщенного пара при давлении, соответствующем давлению насыщенного пара при температуре, соответствующей условиям проведения эксперимента;  $\rho_{\text{water}}$  – плотность воды при атмосферном давлении и температуре, соответствующей условиям проведения эксперимента. Таким образом, для условий эксперимента, близких к обычным (температура 15 °C) [5],

$$C_T |_{\sigma_o=0} \approx C_T |_{\text{атм}} \cdot 1,285 \cdot 10^{-5}.$$

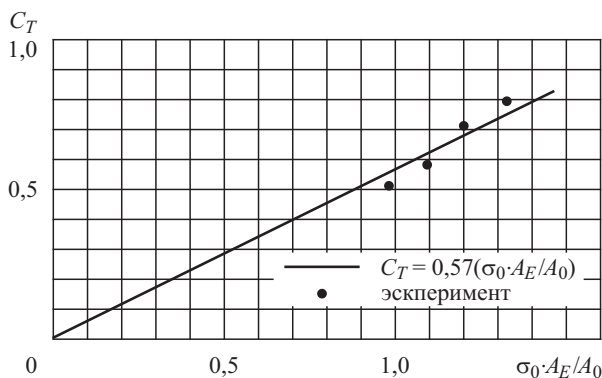
Для подкрепления приведенных выше рассуждений была выполнена и экспериментальная проверка, основанная на обработке результатов испытаний в кавитационной трубе серии СК [4]. Результаты обработки, выполненной для 46 гребных винтов с числом лопастей  $Z = 3$  и  $Z = 5$ , подтверждают существование луча, определяемого формулой (8).

Результаты обработки данных испытаний в кавитационной трубе модели гребного винта А представлены на рис. 11. Видно, что наличие дополнительной точки (0, 0) полезно для представления результатов испытаний в кавитационной трубе. Линию

$$C_T = 0,57(\sigma_o \cdot A_E/A_o)$$

принято называть критической. Если в реальных условиях коэффициент нагрузки по упору  $C_T$  оказывается выше критической линии, то гребной винт работает во второй стадии кавитации, сопровождающейся изменением коэффициентов упора и момента. Если реальное значение  $C_T$  оказывается ниже критической линии, то имеется запас на вторую стадию кавитации.

Использование луча, определяемого формулой (8), является весьма удобным, т.к. предоставляет числовое значение стойкости гребного винта по второй стадии кавитации. Мерой этой стойкости является величина коэффициента  $b$ . Для оптимальных по ходкости гребных винтов величина  $b = 0,5-0,65$ . Для гребных винтов ледоколов и специальных «суперкавитирующих» гребных винтов [4] величина  $b = 0,7-1,0$ .



**Рис. 11.** Зависимость критического значения коэффициента нагрузки  $C_T$  от параметра  $\sigma_o \cdot A_E/A_o$  по результатам испытаний модели гребного винта А

**Fig. 11.** Critical load coefficient  $C_T$  versus parameter  $\sigma_o \cdot A_E/A_o$  as per Propeller A model test data

## Определение запаса на развитую кавитацию для гребных винтов ледоколов, работающих при большой мощности на предельно низких скоростях хода

Determination of second-stage cavitation margin for icebreaker propellers operating at high power and extremely low speeds

Прежде чем рассматривать запасы по второй стадии кавитации для ледоколов, представляется рациональным рассмотреть существующий способ оценки запасов на развитую или вторую стадию кавитации гребных винтов кораблей, работающих на чистой воде. Величину запаса по второй стадии кавитации принято оценивать по следующей схеме.

При заданной скорости хода  $V_S$  в узлах определяют значение скорости  $V = V_S \cdot 0,51444$  м/с и скорости  $V_a = V(1 - W_T)$ , м/с, где  $W_T$  – коэффициент попутного потока.

По развиваемой величине упора гребного винта  $T$  определяют реальное значение коэффициента нагрузки:

$$C_{Treal} = \frac{T}{\frac{\rho V_a^2}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4}}$$

Далее по графику зависимости  $C_T = b \cdot (\sigma_o \cdot A_E/A_o)$  определяется значение критической величины произведения  $(\sigma_o \cdot A_E/A_o)_{cr}$ , а затем по значению дискового отношения  $A_e/A_o$  находится критическое значение числа кавитации:

$$\sigma_{ocr} = (\sigma_o \cdot A_E/A_o)_{cr} / (A_e/A_o).$$

При расчете реальной величины числа кавитации  $\sigma_{oreal}$  принято в натуральных условиях определять давление на относительном радиусе гребного винта  $\bar{r} = 0,8$  при верхнем положении лопасти:

$$p_{0,8} = p_a + \rho g(H_S - 0,4D),$$

где  $p_a = 101\,300$  Н/м<sup>2</sup> – атмосферное давление;  $H_S$  – заглубление оси гребного винта судна, м;  $\rho = 1025$  кг/м<sup>3</sup> – плотность морской воды;

$$\sigma_{oreal} = \frac{p_{0,8} - p_v}{\frac{\rho V_a^2}{2}}$$



Окончательно значение запаса определяется с помощью соотношения

$$\text{Marg} = \left( 1 - \frac{\sigma_{ocr}}{\sigma_{oreal}} \right). \quad (9)$$

Следует отметить, что приведенная выше схема оценки запаса на вторую стадию кавитации не работает на швартовах, например, в связи с тем, что  $V_a = 0$ , а следовательно, коэффициент нагрузки по упору  $C_T$  и число кавитации  $\sigma_o$  стремятся к бесконечности. Кроме того, характерное значение числа кавитации  $\sigma_o$  при скорости хода  $V_S = 30$  уз составляет около 1; при скорости хода  $V_S = 2$  уз –  $\sigma_o = 225$ ; при скорости хода  $V_S = 5$  уз –  $\sigma_o = 40$ . Следовательно, характерные числа кавитации для ледоколов не моделируются в кавитационной трубе. Кроме того, эти числа кавитации затруднительно привести на одном графике с данными экспериментов, полученными в кавитационной трубе.

Чтобы преодолеть указанные трудности, необходимо перейти к другой схеме обезразмеривания упора  $T$  и давления  $P_{0,8} - P_v$ . В качестве характерной скорости можно принять произведение  $nD$ , а вместо характерной площади –  $D^2$ . Тогда

$$\frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} = K_T - \text{коэффициент упора};$$

$$\frac{P - P_v}{\frac{\rho}{2} \cdot n^2 \cdot D^2} = \sigma_b - \text{число кавитации по частоте вращения гребного вала.}$$

С использованием этих переменных результаты испытаний в кавитационной трубе по определению «отвалов» (луч  $C_T = b \cdot (\sigma_o \cdot A_E / A_o)$ ) преобразуются к лучу (критической линии):

$$K_T = \tilde{b} \cdot (\sigma_b \cdot A_E / A_o). \quad (10)$$

С учетом ранее приведенного соотношения для связи  $C_T$  и  $K_T$ , а также соотношения

$$\sigma_o = \frac{\sigma_b}{J^2}$$

можно показать, что тангенс угла наклона  $\tilde{b}$  связан с величиной  $b$  с помощью формулы

$$\tilde{b} = b \cdot \frac{\pi}{8}.$$

При использовании зависимости (10) для оценки запаса на вторую стадию кавитации (по «отва-

лам») необходимо определить реальное значение коэффициента упора гребного винта

$$K_{T \text{ real}} = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$$

и затем найти критическое значение

$$(\sigma_b \cdot A_E / A_o)_{cr} = \frac{K_{T \text{ real}}}{\tilde{b}}$$

и величину критического числа кавитации

$$\sigma_{bcr} = (\sigma_b \cdot A_E / A_o)_{cr} / (A_E / A_o).$$

Далее рассчитывается реальное значение числа кавитации

$$\sigma_{breal} = \frac{P_{0,8} - P_v}{\frac{\rho}{2} \cdot n^2 \cdot D^2}$$

и определяется величина запаса

$$\text{Marg} = \left( 1 - \frac{\sigma_{bcr}}{\sigma_{breal}} \right). \quad (11)$$

Приведенные выше соотношения формально могут быть использованы при любом значении скорости хода  $V_S$  вплоть до швартового режима.

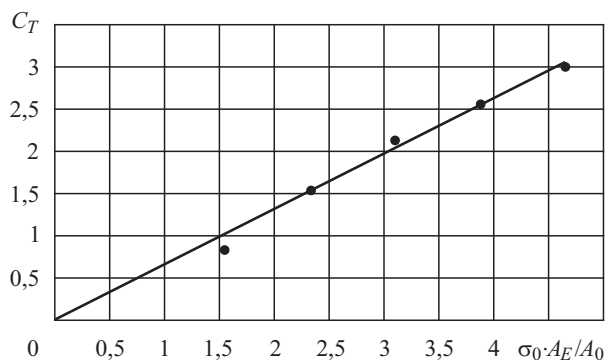
Следует отметить, что применение формулы (10) для оценки запасов на вторую стадию кавитации позволяет на один график нанести результаты испытаний в двух экспериментальных установках: кавитационной трубе и в кавитационном бассейне. Кроме того, на луче (10) находятся точки, соответствующие движению ледокола со скоростью 2 и 5 уз.

В качестве примера ниже приводится обработка результатов испытаний модели гребного винта  $C$  в кавитационной трубе и кавитационном бассейне. Основные геометрические характеристики гребного винта  $C$  представлены в табл. 3. На рис. 12 приве-

**Таблица 3.** Основные геометрические характеристики гребного винта  $C$

**Table 3.** Main geometric parameters for Propeller  $C$

Характеристика	Значение
Диаметр, $D$ , мм	220
Число лопастей, $Z$	4
Шаговое отношение, $P/D$	0,800
Дисковое отношение, $A_E/A_o$	0,774



**Рис. 12.** Зависимость критического значения коэффициента нагрузки  $C_T$  от параметра  $\sigma_0 \cdot A_E / A_0$  по результатам испытаний модели гребного винта С

**Fig. 12.** Critical load coefficient  $C_T$  versus parameter  $\sigma_0 \cdot A_E / A_0$  as per Propeller C model test data

дены результаты испытаний гребного винта С в кавитационной трубе. В табл. 4 даны числовые значения, соответствующие рис. 12.

Анализ результатов, приведенных на рис. 12, показывает, что для модели ледового гребного винта выполняется соотношение

$$C_T = 0,659 \cdot (\sigma_0 \cdot A_E / A_0).$$

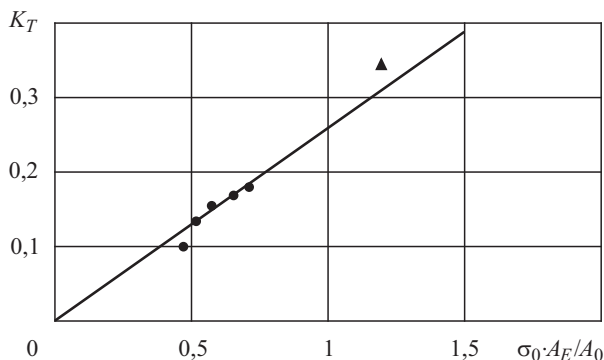
Трансформируя данные рис. 12 в зависимость типа (9), можно записать

$$K_T = 0,255 \cdot (\sigma_b \cdot A_E / A_0), \quad \tilde{b} = 0,255.$$

На рис. 13 треугольником обозначена точка, полученная при испытаниях модели гребного винта С в кавитационном бассейне на швартовах. Этой точке соответствуют следующие числа:

$$\sigma_b = 1,535, \quad K_T = 0,343, \quad \sigma_b \cdot A_E / A_0 = 1,188.$$

С учетом данной точки для  $\tilde{b}$  получается не  $\tilde{b} = 0,255$ , а несколько иное значение –  $\tilde{b} = 0,270$ . Но в целом можно отметить, что согласно предло-



**Рис. 13.** Зависимость критического значения коэффициента упора  $K_T$  от параметра  $\sigma_b \cdot A_E / A_0$  по результатам испытаний модели гребного винта С

**Fig. 13.** Critical thrust coefficient  $K_T$  versus parameter  $\sigma_b \cdot A_E / A_0$  as per Propeller C model test data

женной процедуре данные, полученные в кавитационной трубе и кавитационном бассейне, оказались включенными в одну зависимость и удовлетворительно согласуются друг с другом.

Обработка предложенным единообразным способом испытаний в кавитационной трубе и кавитационном бассейне позволяет, во-первых, более обоснованно определять начало второй стадии кавитации, причем как на полном ходу, так и на швартовом режиме, а во-вторых, оценивать стойкость гребного винта по развитой кавитации одним числом –  $\tilde{b}$ . Использование соотношения (11) позволяет оценивать запасы на вторую стадию кавитации для любого режима работы гребного винта.

Кроме того, при испытаниях в кавитационном бассейне гребного винта за корпусом модели естественным образом удастся оценить влияние корпуса на потребные запасы на вторую стадию кавитации, что невозможно сделать по испытаниям в кавитационной трубе. Этому вопросу будет посвящена отдельная статья.

**Таблица 4.** Обработка результатов испытаний модели гребного винта С в кавитационной трубе

**Table 4.** Processing of cavitation tunnel test data for Propeller C model

$K_T$	$\sigma_0$	$J$	$A_E / A_0$	$C_T$	$\sigma_0 \cdot A_E / A_0$	$\sigma_b$	$\sigma_b \cdot A_E / A_0$
0,1	2	0,55	0,774	0,842238	1,548	0,605	0,46827
0,135	3	0,47	0,774	1,557035	2,322	0,6627	0,51293
0,155	4	0,43	0,774	2,135773	3,096	0,7396	0,57245
0,17	5	0,41	0,774	2,576568	3,87	0,8405	0,650547
0,18	6	0,39	0,774	3,015113	4,644	0,9126	0,706352

## Заключение

### Conclusion

Полученные результаты позволяют отметить следующее:

1. Предложена методика определения запаса гребного винта на развитую кавитацию, содержащая числовой параметр, характеризующий устойчивость гребного винта против развитой кавитации.
2. Предложенная методика работоспособна на любых предельно низких скоростях хода, включая швартовую точку.
3. Анализ экспериментальных и расчетных данных показывает, что работа движителей на начальном этапе второй стадии кавитации является допустимой.
4. Предложенная методика для реализации требует проведения экспериментального исследования модели гребного винта в кавитационной трубе и кавитационном бассейне.
5. Можно отметить, что данные, полученные в кавитационной трубе и кавитационном бассейне, в предложенной методике оказались включенными в одну зависимость и удовлетворительно согласуются друг с другом.
6. Анализ полученных результатов показывает применимость предложенной методики оценки запаса гребных винтов ледоколов, работающих при большой мощности на предельно низких значениях скорости хода на вторую стадию кавитации.

## Библиографический список

### References

1. Справочник по теории корабля. В 3 т. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. [Ship Theory. Reference book. In 3 vol. Under editorship of Ya. Voitkunsky. Vol. 1. Hydromechanics. Ship resistance. Marine propulsors. Leningrad: Sudostroyeniye, 1985. (in Russian)].
2. Басин А.М., Миниович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. Л.: Судпромгиз, 1963. [A. Basin, I. Miniovich. Theory and calculation of propellers. Leningrad: Sudpromgiz, 1963. (in Russian)].
3. Каневский Г.И., Капранцев С.В., Круглова С.Н. Прогнозирование ходовых качеств при наличии развитой кавитации гребных винтов // Тезисы до-

кладов НТК «XLII Крыловские чтения». СПб., 2006. С. 25–27. [G. Kanevsky, S. Kaprantsev, S. Kругlova. Propulsion performance prediction for propellers with second-stage cavitation // Theses of messages, XLII Krylov Readings Scientific & Technical Conference. St. Petersburg, 2006. P. 25–27. (in Russian)].

4. ОСТ 5.4123-74 Винты гребные для быстроходных судов. Методы и нормы проектирования. Приложение № 4. Атлас гидродинамических характеристик гребных винтов [Industrial standard OST 5.4123-74. Propellers for fast ships. Design methods and regulations. Annex 4. Album of hydrodynamic parameters for propellers. (in Russian)].
5. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. М.: МЭИ, 1999. [A. Aleksandrov, B. Grigoryev. Tables of thermophysical properties of water and water vapour. Moscow: Moscow Power Engineering Institute, 1999. (in Russian)].

### 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.: 8 (812) 415-47-91. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Клубничкин Александр Михайлович, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 386-69-78. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Лобачев Михаил Павлович, к.т.н., начальник отделения математического моделирования и высокопроизводительных вычислений ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-45-99.

E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Рудниченко Алексей Андреевич, инженер 2 категории. ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

### About the authors

Kanevsky, Grigory I., D. Sc., Project Manager, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-47-91. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.



*Klubnichkin, Alexandr M.*, Head of Sector, KSRC.  
Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia,  
post code 196158. Tel.: 8 (812) 386-69-78. E-mail:  
krylov@krylov.spb.ru.

*Lobachev, Mikhail P.*, Ph. D., Head of HPC-CFD center,  
KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg,

Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-45-99.  
E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

*Rudhichenko, Alexey A.*, 2<sup>nd</sup> Category Engineer, KSRC.  
Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia,  
post code 196158. Tel.: 8 (812) 748-63-19. E-mail:  
krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 17.01.18  
Принята в печать / Accepted: 01.06.18  
© Коллектив авторов, 2018