

В.А. Андреев, А.В. Пустошный
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА ПРИ НАТЕКАНИИ НА ГРЕБНОЙ ВИНТ ТЯНУЩЕЙ ВИНТО-РУЛЕВОЙ КОЛОНКИ

Объект и цель научной работы. Цель работы – оценить влияние стойки колонки на поле скоростей в потоке, натекающем на лопасти при различных значениях поступи гребного винта. В качестве объекта исследования выбрана плохообтекаемая ледовая движительно-рулевая колонка (ДРК) с вращающимся гребным винтом.

Материалы и методы. Расчет проводился в программном пакете Star CCM+. Рассматривалось трехмерное ламинарно-турбулентное нестационарное обтекание модели ДРК вязкой несжимаемой жидкостью. Для описания ламинарно-турбулентного течения вместе с RANS-моделями турбулентности использовалась модель ламинарно-турбулентного перехода Gamma Re Tetta. Для расчета обтекания ДРК потоком вязкой несжимаемой жидкостью необходимо было решать уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу (RANS). Для определения параметров турбулентности использовалась модель $k-w$ SST.

Основные результаты. Расчеты, выполненные RANS-методом для различных скоростей обтекания колонки в отсутствие гребного винта, показали, что в этом случае распределение вызванной скорости перед стойкой не зависит от скорости обтекания (т.е. работает модель потенциального обтекания профиля стойки). Распределения окружной скорости в диске гребного винта показали, что наличие стойки приводит к погрешности в определении минимальной скорости около 4 % в зонах малонагруженных винтов ($J = 0,6$), и около 9 % в зоне 50 % подторможенности потока в следе за корпусом, что соответствует поступи $J = 0,3$.

Заключение. Проведенное исследование позволило оценить эффект влияния стойки тянущей ледовой колонки на условия обтекания лопастей гребного винта. Исходя из данной оценки, возникает необходимость некоторого смещения расчетной кавитационной диаграммы влево при проектировании винта (до 10 % локальной мгновенной поступи при характерном значении максимальной подторможенности потока, натекающего на колонку, порядка 50 %).

Ключевые слова: гребной винт, движительно-рулевая колонка, RANS-метод, скорость обтекания.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Андреев В.А., Пустошный А.В. Расчетное исследование потока при натекании на гребной винт тянущей винто-рулевой колонки. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 1(383): 73–80.

УДК 629.5.037.1:629.5.062.12

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-73-80

V. Andreev, A. Pustoshny
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

ANALYTICAL STUDY OF INFLOW AROUND THE PROPELLER OF PULLING POD UNIT

Object and purpose of research. The purpose of this work was to assess the effect of pod unit strut upon the wake field of the inflow around propeller blades at different advance ratios. The object of the study was a bluff pod propulsion unit (PPU) with rotating propeller.

Materials and methods. Calculation was performed in STAR CCM+ software package for the case of three-dimensional unsteady laminar-turbulent viscous incompressible flow around PPU. This laminar-turbulent flow was described by means of both RANS models and Gamma Re Tetta laminar-turbulent transition model. To calculate incompressible viscous flow around PPU, it was necessary to solve Reynolds-averaged Navier – Stokes (RANS) equations. Turbulence parameters were determined as per $k-w$ SST model.

Main results. RANS calculations for various flow speeds around the pod unit without the propeller have shown that in this case induced speed distribution in front of the strut is independent on flow speed, i.e. corresponds to the model of potential flow around strut profile. Circumferential speed distribution in the propeller disk have shown that strut causes the errors in determi-

nation of the minimum speed: about 4 % in the areas of lightly loaded propellers ($J = 0.6$) and about 9 % in the area of 50 % deceleration of the flow behind the hull, which corresponds to advance ratio $J = 0.3$.

Conclusion. This study enabled estimation of how the strut of pulling ice-resistant pod propulsion unit affects the flow around its propeller blades. This estimate necessitates a certain leftward shift of the propeller's design cavitation bucket (up to 10 % of local instantaneous advance ratio at the characteristic value, i.e. about 50 %, of the maximum inflow deceleration around the pod unit).

Key words: propeller, pod unit, RANS-method, flow speed.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Andreev V., Pustoshny A. Analytical study of inflow around the propeller of pulling pod unit. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 1(383): 73–80 (in Russian).

УДК 629.5.037.1:629.5.062.12

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-73-80

Введение

Introduction

Широкое применение поворотных движительно-рулевых колонок в качестве главных движителей судов различных классов инициировало в последние годы широкий круг исследований, посвященных различным аспектам применения колонок и непосредственно связанных с выполнением широкого круга требований, предъявляемых к колонкам судов различного назначения [1]. Появились суда различных типов (пассажирские, ледовые транспортные, ледоколы), оснащенные тремя, а в ряде проектов – даже четырьмя колонками.

Одним из основных преимуществ тянущих колонок является то, что их гребные винты находятся перед гондолой и стойкой. При этом, вследствие отсутствия валов перед винтами, неоднородность поля скоростей, натекающего на гребные винты потока, крайне незначительна и определяется только влиянием пограничного слоя корпуса. Это обуславливает широкое применение колонок на пассажирских судах, где вопросы кавитации и снижения вибраций, индуцированных кавитирующими гребными винтами, тесно связаны с возможностью организации максимального числа кают для размещения пассажиров в кормовой оконечности, где ранее вибрации не позволяли этого сделать.

Однако с появлением трехвинтовых судов с колонками обнаружилось, что кавитационные качества средних гребных винтов, расположенных в следе за килевой коробкой корпуса, несколько хуже, чем для бортовых винтов, работающих в более равномерном потоке. Особенно явно это проявляется для транспортных судов с достаточно полными обводами.

Как следует из опыта проектирования гребных винтов для колонок AZIPOD в Крыловском государственном научном центре (КГНЦ), до настоящего времени для получения в качестве исходной ин-

формации для проектирования винта поля скоростей в месте расположения винта в крупных мировых исследовательских центрах зачастую проводились модельные испытания без установленных колонок, т.е. измерялось поле скоростей только за корпусом. Измерения поля скоростей перед установленной колонкой проводились редко, так как они существенно сложнее и требуют специального оборудования (в КГНЦ используют Г-образный подвод зонда, позволяющий измерять скорости непосредственно перед стойкой). Считалось, что подторможенность потока в подпорной зоне перед стойкой колонки незначительна и не может заметно повлиять на поток при работающем винте.

Однако кавитационные испытания спроектированных в КГНЦ гребных винтов на зарубежных установках за корпусом модели показали, что в зонах сильно подторможенного корпусом потока трехвального судна (в следе за килевой коробкой) картины кавитации оказались хуже, чем ожидалось. Ранее кавитационные характеристики винтов для двухвальных судов всегда успешно прогнозировались в КГНЦ на основании испытаний моделей колонок в свободной воде с учетом локальной поступи в неоднородном поле скоростей за корпусом. В работе [2] показано, что одной из причин такого эффекта является использование в зарубежных центрах искусственной шероховатости на лопастях в кавитационных испытаниях. Тем не менее, ряд данных (включая натурные наблюдения кавитации) заставляли искать дополнительные причины отличия кавитационной картины от прогноза. В частности, зарегистрированные в ходе модельных и натурных испытаний картины кавитации давали основания предполагать, что неоднородность потока в зоне максимальной подторможенности больше, чем она прогнозируется при использовании методов, много лет применявшихся для проектирования колонок двухвальных судов.

Одна из гипотез более сильной подторможенности потока перед стойкой заключалась в следующем: как экспериментально показано в докторской диссертации А.В. Пустошного, абсолютные величины скоростей за работающим гребным винтом не зависят от поступи винта и выражаются как $V = n \cdot D \cdot J_o$, где n – частота вращения винта, – его диаметр, J_o – поступь нулевого упора. Это значит, что стойка колонки в струе винта при любой поступи гребного винта обтекается примерно с одинаковыми скоростями. Поэтому скорости в потоке, вызванные обтеканием стойки и непосредственно перед стойкой направленные вперед, также примерно равны при всех значениях поступи. При высоких скоростях обтекания винта (высоких значениях поступи) эти вызванные стойкой скорости малы относительно скорости натекающего на винт потока. В зоне подторможенности те же величины вызванных стойкой скоростей направлены против потока с существенно меньшими скоростями, и, следовательно, способны исказить картину обтекания лопастей в существенно большей степени по сравнению с прогнозом без учета вызванных скоростей от стойки.

Задачей настоящего исследования являлась проверка этой гипотезы. С учетом сложности расчетов для судна с гребным винтом, работа включала расчет обтекания тянувшей колонки с работающим винтом в отсутствие корпуса судна (в свободной воде) с широкой вариацией поступи винта (от швартового до величин, характерных для ходовых режимов). При этом были рассчитаны скорости потока в сечении перед работающим гребным винтом и оценено различие между потоком, натекающим на лопасти перед стойкой, и в нижнем положении лопасти, где влияние стойки заведомо отсутствует.

Описание расчетного метода

Description of the analytical method

Расчетная модель колонки

В качестве объекта исследования выбрана плохообтекаемая ледовая ДРК с вращающимся гребным винтом. Для проведения расчетов данный объект разделяется на две части: подвижную (вращающуюся) – гребной винт, и неподвижную, включающую в себя гондолу и стойку (рис. 1).

Для ограничения расчетной области были построены граничные плоскости на расстоянии 10 диаметров винта спереди и сзади и 5 диаметров винта по бокам и снизу. Положение верхней плоскости совпадает с верхней точкой стойки ДРК. Как показала практика, такое расположение граничных плоскостей

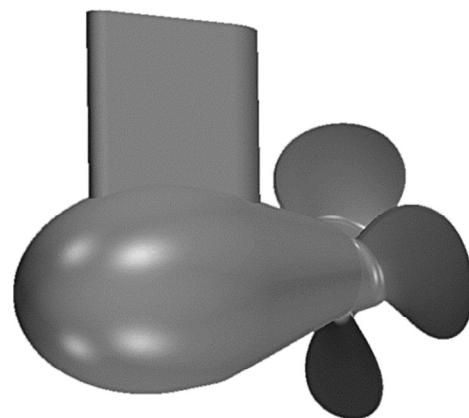


Рис. 1. Геометрия колонки – объекта исследования

Fig. 1. Pod unit geometry

стей достаточно для того, чтобы исключить их влияние на получаемое решение. Таким образом, расчетная область представляет собой параллелепипед, внутри которого находится объект исследования.

Для передачи численной информации из вращающейся части в неподвижную строятся два идентичных цилиндра. Один цилиндр входит в неподвижную часть, второй – во вращающуюся. Условие передачи информации из одной области в другую называется интерфейсом. Данное условие ставится на поверхности обоих цилиндров. Диаметр цилиндров равен $1,5D$, где D – диаметр винта. В целях улучшения качества расчетной сетки около границы вращающейся и неподвижной областей цилиндр был продлен в сторону стойки так, чтобы передняя часть гондолы оказалась внутри него.

Для данной геометрии была построена расчетная сетка, состоящая из 12 миллионов ячеек. Характерный размер ячейки, соответствующий расчету для модельной колонки с 200 мм гребным винтом, составлял $2,5 \cdot 10^{-3}$ м. Как показали дальнейшие исследования сеточной независимости, такой размер является достаточным, чтобы описать все необходимые эффекты, возникающие при обтекании винто-рулевой колонки. Сетка представлена на рис. 2.

Построенная сетка не являлась однородной: для того, чтобы более точно рассчитать области с повышенными градиентами параметров потока и для улучшения качества описания геометрии в областях с повышенной кривизной были произведены сгущения в следующих областях:

- в передней и задней части стойки ДРК;
- в окрестностях входящей и выходящей кромки гребного винта, а также галтели лопастей гребного винта.

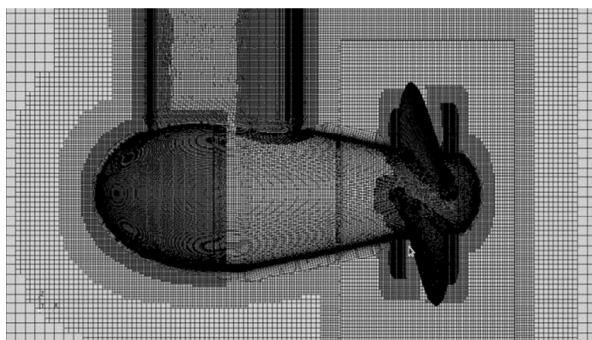


Рис. 2. Расчетная сетка
Fig. 2. Analytical mesh

Вблизи стенок использовалась сетка, повторяющая форму геометрии расчетной области, содержащая 20–30 ячеек. Такая сетка называется призматической, она близка к ортогональной, что позволяет более корректно рассчитать поток вблизи корпуса ДРК и гребного винта. При построении данной сетки задавалась толщина призматического слоя, число призматических слоев и толщина первого пристенного слоя. Последний параметр определялся безразмерным расстоянием от стенки первой расчетной точки

$$y^+ = U_t l / v,$$

где $U = \sqrt{W'}$ – динамическая скорость в пристенной ячейке, τ_w – напряжение трения на стенке, l – расстояние от твердой поверхности до первой расчетной точки, v – коэффициент кинематической вязкости. Параметр y^+ определялся следующим образом: производился начальный расчет (несколько временных шагов), далее вычислялось среднее значение y^+ , и по результатам вычислений корректировалась толщина пристенной ячейки, чтобы значение y^+ было меньше 1.

По направлению от корпуса ДРК сетка в призматическом слое постепенно расширялась: количество ячеек в призматическом слое выбрано таким, чтобы коэффициент расширения не превышал 1.2.

Расчетный метод

В отличие от применяющихся обычно для исследований обтекания ДРК расчетных методов чисто турбулентного обтекания (например, [3]), в данной работе рассматривалось трехмерное ламинарно-турбулентное нестационарное обтекание модели ДРК вязкой несжимаемой жидкостью. Для описания ламинарно-турбулентного течения вместе

с RANS-моделями турбулентности использовалась модель ламинарно-турбулентного перехода Гамма Re Tetta. Данную модель необходимо использовать при расчете модели, т.к. в этом случае при обтекании корпуса ВРК имеют место значительные области ламинарного течения. Неучет ламинарных областей течения в модельных условиях приводит к существенному искажению результата расчета величины сопротивления модели корпуса ДРК.

Для расчета обтекания ДРК потоком вязкой несжимаемой жидкости необходимо было решать уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу (RANS). Для замыкания данных уравнений использовалась гипотеза Буссинеска, суть которой заключалась в том, что влияние турбулентности можно описать через турбулентную вязкость μ_t . Для определения параметров турбулентности использовалась модель $k-w$ SST. Данная модель подходит для расчета как пристенных, так и струйных течений.

Для дискретизации производных в вышеописанной системе уравнений применялись следующие схемы:

- для производной по времени – неявная схема второго порядка точности;
- для конвективных членов – противопоточная схема второго порядка точности;
- для градиента давления и диффузионных членов – центрально-разностная схема второго порядка точности.

Для восстановления поля давления использовался метод SIMPLE.

На плоскостях, ограничивающих расчетную область, были поставлены граничные условия. На входе задавались следующие условия:

- скорость набегающего потока;
- отношение турбулентной вязкости к молекулярной – было задано постоянное значение, равное 100;
- интенсивность турбулентности ($= \sqrt{2/3k}$) – задано постоянное значение 0,005;
- давление – экстраполяция из соседних ячеек сетки.

На верхней плоскости задавалось условие симметрии. Все остальные границы считались границами выхода потока. Условия на данных границах выглядели следующим образом:

- гидродинамическое давление $p = 0$;
- отношение турбулентной вязкости к молекулярной и интенсивность турбулентности были заданы те же, что и на входе. Данные параметры принимали значения 100 и 0,005 соответственно.

Параметры задачи

Parameters of the problem

В рамках данной задачи частота вращения винта n принималась постоянной и составляла 15 об/с. Значения размерной скорости набегающего потока на входе и соответствующих значений относительной поступи и чисел Рейнольдса представлены в табл. 1.

Число Рейнольдса определялось по формуле

$$Re = \frac{C_{0,7R}(V_A^2 + (0,7 nD)^2)^{\frac{1}{2}}}{v},$$

где $C_{0,7R}$ – длина хорды лопасти гребного винта на радиусе $0,7R$ (R – радиус гребного винта); V_A – скорость набегающего потока; D – диаметр гребного винта; n – частота вращения винта; v – коэффициент кинематической вязкости.

После построения расчетной сетки и задания граничных условий на границах расчетной области задавались такие параметры, как шаг по времени и количество итераций внутри шага. Шаг по времени выбирался таким, чтобы он соответствовал двухградусному повороту гребного винта, это соответствует величине $\Delta t = 3,7 \cdot 10^{-4}$ с. При этом число Куранта вблизи корпуса ДРК принимало значение порядка 3–4. Такое число Куранта обусловлено тем, что в дискретизации уравнений турбулентности использованы неявные схемы. Это позволяет использовать число Куранта больше 1, однако слишком большое его значение снижает качество разрешения вихревых зон за корпусом ВРК. Таким образом, исходя из опыта решения подобных задач выявлено, что значения числа Куранта в диапазоне 3–4 являются оптимальными.

Количество итераций в рамках одного шага по времени выбиралось равным 12, что является достаточным для того, чтобы численное решение задачи сходилось. Данные параметры оставались неизменными для всех чисел Рейнольдса.

Результаты расчета

Calculation results

На рис. 3–6 представлено распределение продольной компоненты скорости в непосредственной близости от гребного винта в плоскости, расположенной на расстоянии вверх по потоку 0,06 м от диска гребного винта, что соответствует расстоянию от крайней точки передней кромки 0,04 мм, в зависимости от угловой координаты. Данные распределения представлены для разных относительных

Таблица 1. Параметры расчета

Table 1. Calculation parameters

V , м/с	J	Re
0	0	$2,15 \cdot 10^5$
0,90	0,30	$2,17 \cdot 10^5$
1,44	0,48	$2,20 \cdot 10^5$
1,80	0,60	$2,22 \cdot 10^5$

поступей. Поступь 0,6 примерно соответствует расчетной поступи гребного винта, поступь 0,3 – мгновенной поступи лопасти при 50 % подторможенности потока в следе за корпусом.

Следует обратить внимание, что пик минимальной скорости в районе угла 0 градусов, где

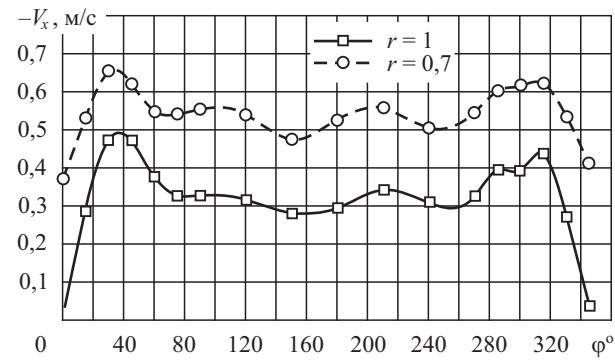


Рис. 3. Распределение продольной компоненты скорости перед диском гребного винта на двух радиусах, $J = 0$

Fig. 3. Longitudinal speed component distribution in front of the propeller disk at two radii, $J = 0$

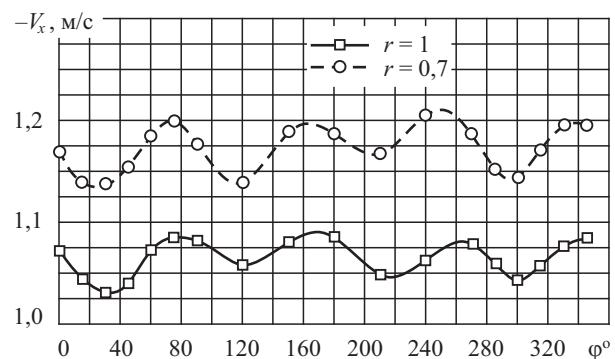


Рис. 4. Распределение продольной компоненты скорости перед диском гребного винта на двух радиусах, $J = 0,3$

Fig. 4. Longitudinal speed component distribution in front of the propeller disk at two radii, $J = 0,3$

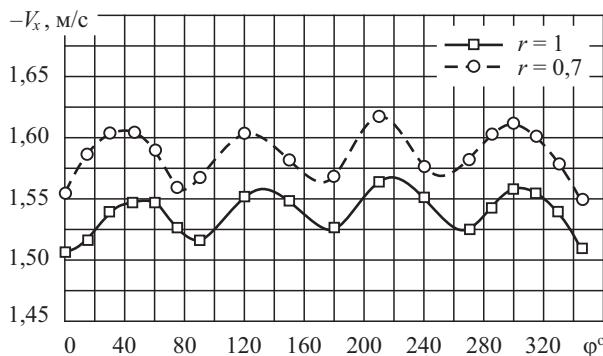


Рис. 5. Распределение продольной компоненты скорости перед диском гребного винта на двух радиусах, $J = 0,48$

Fig. 5. Longitudinal speed component distribution in front of the propeller disk at two radii, $J = 0.48$

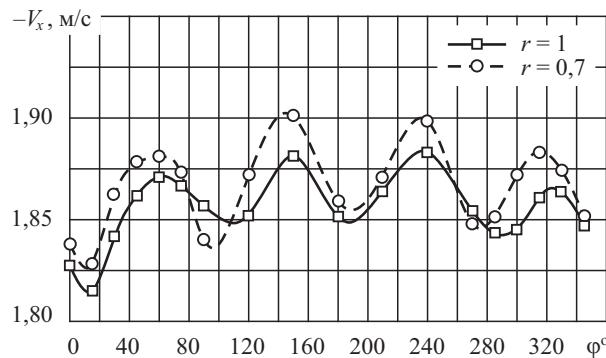


Рис. 6. Распределение продольной компоненты скорости перед диском гребного винта на двух радиусах, $J = 0,6$

Fig. 6. Longitudinal speed component distribution in front of the propeller disk at two radii, $J = 0.6$

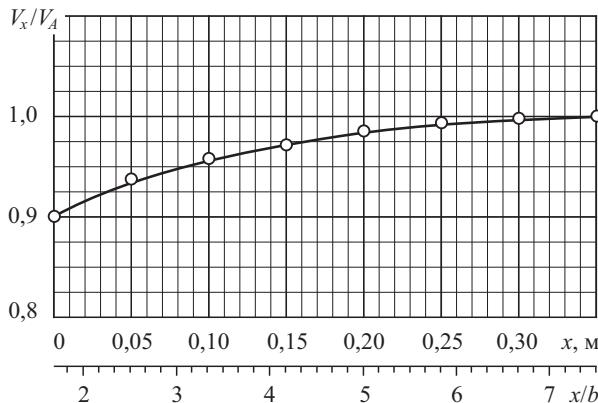


Рис. 7. Влияние стойки колонки на скорость потока в отсутствие винта

Fig. 7. Effect of strut upon the flow speed without propeller

имеет место влияние от стойки, отличается от пика в районе угла 180 градусов, где влияние стойки гарантированно отсутствует (некоторые отличия в положении минимума скорости вблизи 0 градусов могут быть обусловлены различием в зависимости от поступи траектории развития потока от винта, натекающего на стойку, и, соответственно, различием направления вектора скорости, вызванной стойкой вперед по потоку). Сравнение графиков показывает, что для всех скоростей на радиусе 0,7 величина различия между минимумом скоростей составляет около 0,03 м/с. Периодические изменения кривой зависимости скорости перед винтом от угла объясняются локальным влиянием лопастей (перед каждой лопастью имеется своя зона вызванных скоростей). Тем не менее, для всех значений поступи винта минимум перед стойкой примерно на 0,03 м/с ниже, чем пик в районе 180 градусов. Кривые рис. 3–6 позволяют выделить также вызванные скорости от винта в рассматриваемом сечении и определить, каково влияние стойки на скорость эффективного потока (потока, натекающего на винт за вычетом вызванных скоростей). Выполненные оценки скорости представлены в табл. 2, где скорости в числителе даны в размерном виде (на основании графиков рис. 3–6), а в знаменателе – в безразмерном виде относительно скорости натекающего потока.

Расчеты, выполненные RANS-методом для различных скоростей обтекания колонки в отсутствие гребного винта, показали, что в этом случае распределение вызванной скорости перед стойкой не зависит от скорости обтекания (т.е. работает модель потенциального обтекания профиля стойки). На рис. 7 показано распределение безразмерной скорости вдоль оси винта начиная с диска винта (абсцисса 0) и далее вверх по потоку. Расстояния от диска винта вперед по потоку даны как в метрах, так и в долях от толщины стойки (во втором случае дано расстояние от носика стойки). Напомним, что расстояние между анализируемым при расчетах сечением и диском винта составляет 0,06 м, и, таким образом, величина скорости потока в отсутствии винта в этом сечении с учетом вызванной колонкой скорости составляет около 0,94.

Данные табл. 2 показывают, что после исключения скоростей, вызванных лопастью, влияние стойки увеличивается с увеличением нагрузки винта (снижением поступи). Если использовать при проектировании винта данные измерений поля скоростей в отсутствие на модели колонки, наличие стойки приводит к погрешности в определении

Таблица 2. Анализ составляющих аксиальной скорости по данным расчетов

Table 2. Analysis of axial speed components as per calculation data

Поступь	Скорость потока, м/с	Скорость мин. вблизи 0 град., м/с	Скорость макс. вне зоны влияния лопастей, м/с	Скорость, вызванная винтом, м/с	Скорость мин. номин.
<i>J</i>	V_A	V_0	V_{180}	$\Delta V = V_{180} - V_A$	$V_{nom} = V_0 - \Delta V$
0,30	0,90/1	1,13/1,25	1,21/0,34	0,31/0,34	0,82/0,91
0,48	1,48/1	1,56/1,05	1,62/1,10	0,14/0,09	1,42/0,94
0,60	1,80/1	1,83/1,02	1,90/1,06	0,10/0,55	1,73/0,96

минимальной скорости около 4 % в зонах малонагруженных винтов, и около 9 % в зоне 50 % подторможенности потока в следе за корпусом (расчет при поступи 0,3 моделировал работу лопасти в зоне 50 % подторможенности по отношению к расчетной поступи винта 0,6).

Таким образом, использование поля скоростей, замеренного в отсутствие колонки, является, с некоторой погрешностью, приемлемым при достаточно равномерном потоке, натекающем на гребной винт судна с двумя колонками, но совершенно неприемлемым для среднего винта трехвальных судов, где подторможенность натекающего на колонку потока в следе за килевой коробкой составляет около 50 %. Для проектирования среднего винта необходимо измерение поля скоростей перед установленной на модели колонкой. Возможен также приближенный учет влияния колонки, когда неоднородность, измеренную за корпусом в отсутствие колонки, следует суммировать с неоднородностью перед стойкой, принятой для положения диска винта в долях от толщины стойки. Неучет влияния колонки на поле скоростей приведет к погрешности определения минимального значения локальной мгновенной поступи лопасти в зоне максимальной подторможенности по расчету до 9–10 %, что должно учитываться при проектировании винта с учетом кавитационных характеристик (требуется такое изменение геометрии винта, которое обеспечит заметное смещение левой ветви кавитационной диаграммы в сторону меньших значений поступи).

Заключение

Conclusion

Проведенное исследование позволило оценить эффект влияния стойки тянувшей ледовой колонки на условия обтекания лопастей гребного винта. Пока-

зано, что это влияние наиболее заметно при малых значениях поступи винта (порядка 0,5 от расчетной поступи), т.е. оно усиливается, если подторможенность перед стойкой колонки суммируется с подторможенностью потока, обусловленной пограничным слоем корпуса и следом за килевой коробкой. В этом случае использование при проектировании гребного винта номинального потока без должной корректировки с учетом скорости, вызванной влиянием стойки при работающем гребном винте, будет приводить к недооценке неоднородности в опасную (с точки зрения кавитации) сторону.

Учет выявленного обстоятельства вызывает необходимость при проектировании винта некоторого смещения расчетной кавитационной диаграммы влево (до 10 % локальной мгновенной поступи при характерном значении максимальной подторможенности потока, натекающего на колонку, порядка 50 %).

Библиографический список

References

1. Пустошный А.В. Проблемы ходкости транспортных судов. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2016. [A. Pustoshny. Propulsion performance of cargo carriers. St. Petersburg: KSRC, 2016. (in Russian)].
2. Pustoshny A.V., Darchiev G.K., Frolova I.G. The problem of propeller design for high ice class transportation ships // Proceeding of Fifth international symposium on Marine propulsors. Espoo, Finland. June 2017: 390–7.
3. Chicherin I.A., Pustoshny A.V., Lobatchev M.P., Sanchez-Gaya A. On a propulsion prediction procedure for ships with podded propulsors using RANS-code analysis // Proceedings of First International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion. 2004: 223–33.

Сведения об авторах

Андреев Виктор Андреевич, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-33-64. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Пустошный Александр Владимирович, д.т.н., член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник-консультант ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: +7 (921) 230-30-16. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Andreev, Viktor A., Engineer, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-33-64. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Pustoshny, Aleksandr V., D. Sc., Corresponding Member of Russian Acad. Sc., Principal Research Scientist / Consultant, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: +7 (921) 230-30-16. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 01.02.18

Принята в печать / Accepted: 05.03.18

© Андреев В.А., Пустошный А.В., 2018