

УДК 629.122

DOI: 10.37890/jwt.vi79.493

Исследование напряженного состояния кормового крыла СПК на 120 пассажиров

С.Н. Гирин¹

ORCID: 0009-0001-3741-8502

А.С. Гусев¹

¹*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. В статье приводится сравнение результатов расчета напряженного состояния (НС) кормового крыла судна на подводных крыльях (СПК) пр.03830, спроектированного фирмой «SeaTech». Кормовое крыло в данном проекте воспринимает 70% веса корпуса судна, поэтому является наиболее нагруженным. В отличие от большинства проектов речных СПК конструкция кормового крыла является не сплошной, а наборной, поэтому применение стержневой расчетной схемы для его расчета, предусмотренной Правилами Российского Классификационного Общества (ПРКО), вызывает сомнения. Кормовое крыло работает в потоке жидкости за носовым крылом, поэтому также вызывает сомнения рекомендации ПРКО о равномерном распределении нагрузки по длине и хорде крыла. В связи с этим, рассмотрены две конструктивные схемы крыла: стержневая и объемная. Расчеты этих схем выполнены методом конечных элементов, с помощью пакета программ ANSYS Mechanical. Нагружение стержневой схемы выполнено с использованием рекомендаций ПРКО, а объемная схема рассчитана на два вида нагружения: по ПРКО и по результатам расчета, выполненного в программном комплексе AUTOWING, основанном на теории дискретных вихрей. Выполненные расчеты показали, что напряжения в крыле, вычисленные на основании рекомендаций ПРКО, существенно меньше по сравнению с более подробной расчетной схемой, учитывающей особенности конструкции крыла и его нагружения.

Ключевые слова: судно на подводных крыльях, подводные крылья, расчет прочности, напряженное состояние, прочность кормового крыла, Правила Российского Классификационного Общества, ANSYS, AUTOWING.

The study of the stress state of the aft wing of the hydrofoil vessel for 120 passengers

Stanislav N. Girin¹

ORCID: 0009-0001-3741-8502

Alexander S. Gusev¹

¹*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The article presents a comparison of the results of stress state calculation of the stern wing of hydrofoil of hydrofoil vessel 03830 pr.03830 designed by SeaTech. The stern wing in this project takes 70% of the hull weight of the vessel, so it is the most loaded. In contrast to the majority of the river SPK projects, the stern wing construction is not solid, but a set, so the use of the rod design scheme for its calculation, stipulated by the Rules of the Russian Classification Society (RCS), is questionable. The aft wing operates in the fluid flow behind the nose wing, so also questionable is the recommendation of the RCS on the uniform distribution of the load along the length and chord of the wing. In this regard, two structural schemes of the wing are considered: rod and volumetric. The calculations of these schemes are performed by the finite element method, using the ANSYS Mechanical program package. The loading of the rod scheme was performed using the PRCO recommendations, and the volumetric scheme was calculated for two types of loading: by PRCO and by the results of

the calculation performed in the AUTOWING software package based on the discrete vortex theory. The performed calculations showed that the stresses in the wing calculated on the basis of the PRCO recommendations are significantly lower compared to a more detailed design scheme that takes into account the peculiarities of the wing structure and its loading.

Keywords: hydrofoil vessel, hydrofoil, strength calculation, stress state, strength of rear foil, Rules of the Russian Classification Society, ANSYS, AUTOWING.

Введение

В настоящее время в нашей стране предпринимаются шаги для возрождения скоростного флота, проектируются и строятся новые суда на подводных крыльях. В процессе проектирования СПК важное место уделяется проектированию крыльевых устройств (КУ). Вопросам проектирования КУ и определения воспринимаемых ими усилий посвящена многочисленная литература, в частности [1] – [5]. Рекомендации по расчету нагрузок на КУ и выбору расчетных схем содержатся в правилах классификационных обществ [6] и [7]. К сожалению, Правила не учитывают последних достижений науки в области проектирования СПК, особенно это касается ПРКО [6], что было отмечено в работе [8]. В частности, методика расчета КУ в [6] основана на использовании стержневой схемы. Опыт проектирования и эксплуатации СПК показал, что применение такой методики оправдано для крыльевых устройств (КУ) со сплошными поперечными сечениями. Очевидно, что для сборной конструкции КУ данная методика может приводить к существенным погрешностям в расчетах НС.

В настоящей статье проводится исследование напряженного состояния кормового крыла СПК пр.03830, спроектированного фирмой «SeaTech». В данном проекте крыльевая система спроектирована по схеме «утка». Распределение подъемных сил при этой схеме таково, что 30% веса судна приходится на носовое крыло и 70% на кормовое. Поэтому в качестве объекта исследования принято именно кормовое крыло, как наиболее нагруженное. Кормовое крыло имеет наборную конструкцию. Расчеты НС в КУ выполнены с использованием пакета программ ANSYS Mechanical. Для сопоставления результатов расчета рассмотрена традиционная схема в виде стержневой системы, а также схема более подробного моделирования с применением оболочечных и объемных элементов. В последнем случае использована схема нагружения, рекомендованная ПРКО, а также схема распределения давлений на поверхность КУ, полученная по результатам расчета в комплексе AUTOWING.

Методика определения нагрузок на кормовое крыло

В соответствии с Правилами РКО прочность крыльевого устройства проверяется на действие вертикальной силы на волнении, а также на совместное действие вертикальных сил на тихой воде и горизонтальной силы при циркуляции, приложенной в местах соединения стоек. Вертикальные силы распределяются равномерно по размаху крыла и направлены по нормали к несущей поверхности. В табл. 1 приведено вычисление указанных сил.

Правилами РКО предполагается, что нагрузка равномерно распределена по поверхности крыла. Для уточнения распределения нагрузки по размаху и хорде крыла выполнены расчеты в программном комплексе AUTOWING, основанном на теории дискретных вихрей, в частности, на замене поверхности набором вихревых рамок.

Так как кормовое крыло находится в набегающем потоке от работы носового, в расчете учитывается всё крыльевое устройство. Для ускорения процесса рассчитывается половина крыльевого устройства (КУ) с учетом симметрии.

По рекомендациям [9, 10] выбраны размеры расчетной области жидкости, показанные на рис.1: (10 хорд кормового крыла от по ширине, 3 хорды в нос от носового крыла и 10 хорд в корму от кормового). Размер панелей крыла принят равным 20 мм, а размер панелей волновой поверхности – 100 мм. Углы атаки носового и кормового крыла приняты равными соответственно 1° и 0,5°

С помощью AUTOWING возможно определить подъемные силы только на тихой воде; сила на волнении вычислена по ПРКО.

Таблица 1

Внешние нагрузки, действующие на кормовое крыло по ПРКО

№	Наименование величины	Обозначение, формула	Численное значение	Единицы измерения
1	Полное водоизмещение судна	D'	80	т
2	Скорость в крыльевом режиме	v	64 (17,8)	км/ч (м/с)
3	Расстояние между точками приложения сил поддержания на НКУ и ККУ	l_0	23,39	м
4	Отстояние центра тяжести судна от точки приложения силы поддержания на НКУ	l_n	15,3	м
5	Сила поддержания ККУ на Т.В.	$F_{TK}=9,81 \cdot D' \cdot l_w / l_0$	513,4	кН
6	Высота волны	h	1,4	м
7	Коэффициент, зависящий от высоты волны	k	2,1	-
8	Вертикальная сила на волнении	$P_k=0,75 \cdot k \cdot F_{TK}$	808,5	кН
9	Горизонтальная сила на циркуляции	$P_c=20,59 \cdot 10^{-3} \cdot D' \cdot v^2 / l_0$	28,2	кН

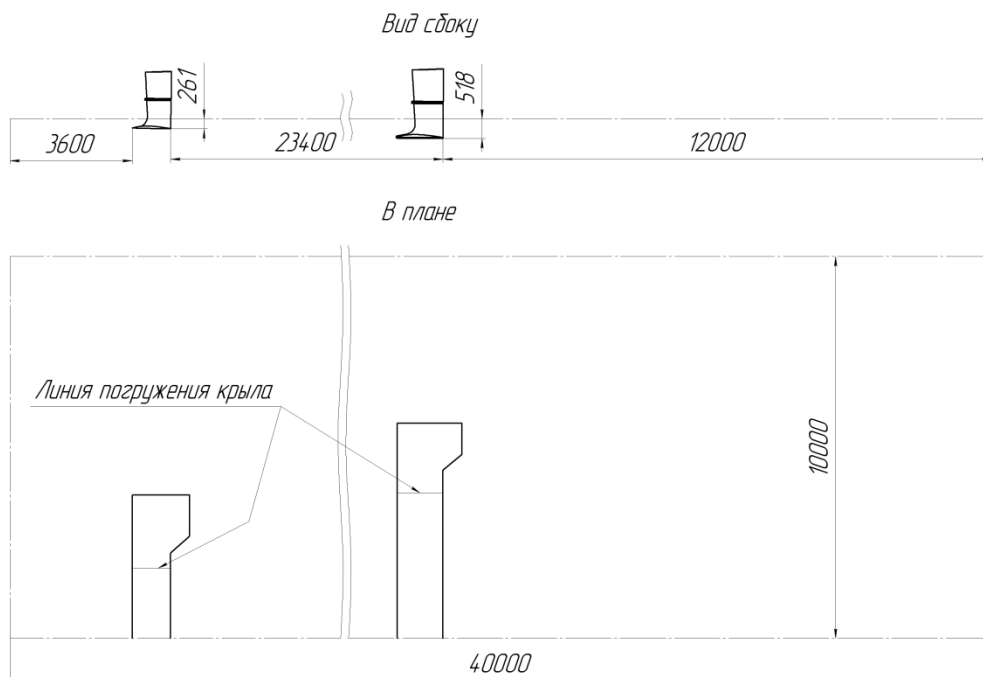


Рис.1. Размеры расчетной области

По результатам расчета получена картина волновой поверхности, представленная на рис.2 и 3, а также распределение давлений на верхнюю и нижнюю плоскости кормового крыльевого устройства (рис. 4 и 5).

Шкала на рис. 4 и 5 приведена в относительных величинах давления, т.е. для перевода в кПа необходимо их умножить на $0,5\rho \cdot v^2$,

где $\rho = 1,0 \frac{\text{т}}{\text{м}^3}$ –плотность воды;

$v = 20\text{м/с}$ –скорость судна.

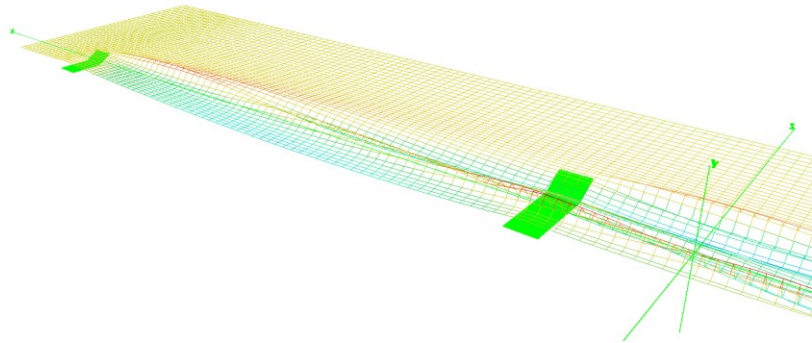


Рис. 2. Изометрическое изображение вихревой поверхности (AUTOWING)

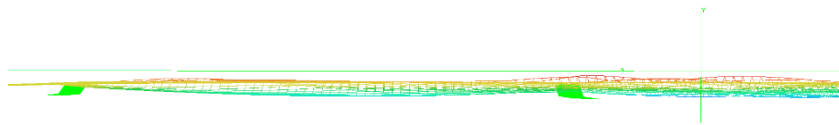


Рис.3. Вид сбоку волновой поверхности (AUTOWING)

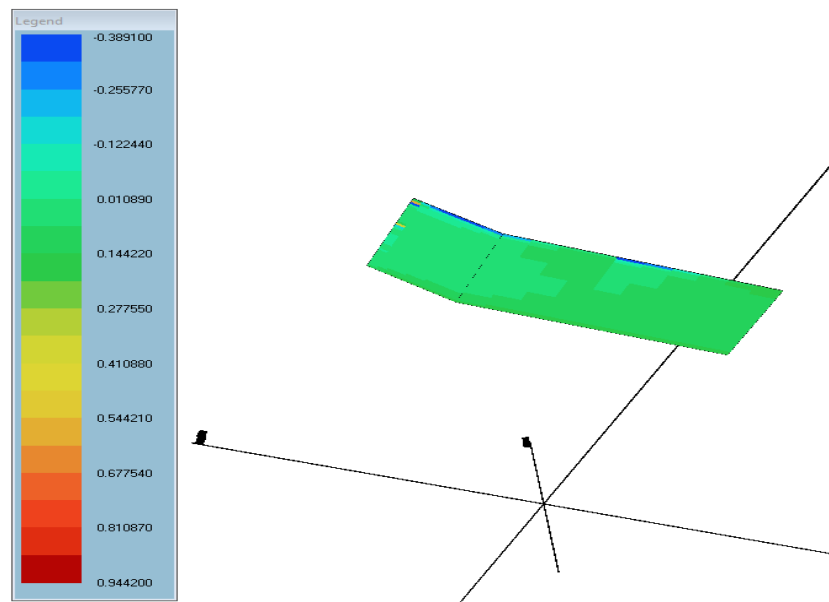


Рис. 4. Распределение давлений по нижней поверхности крыла

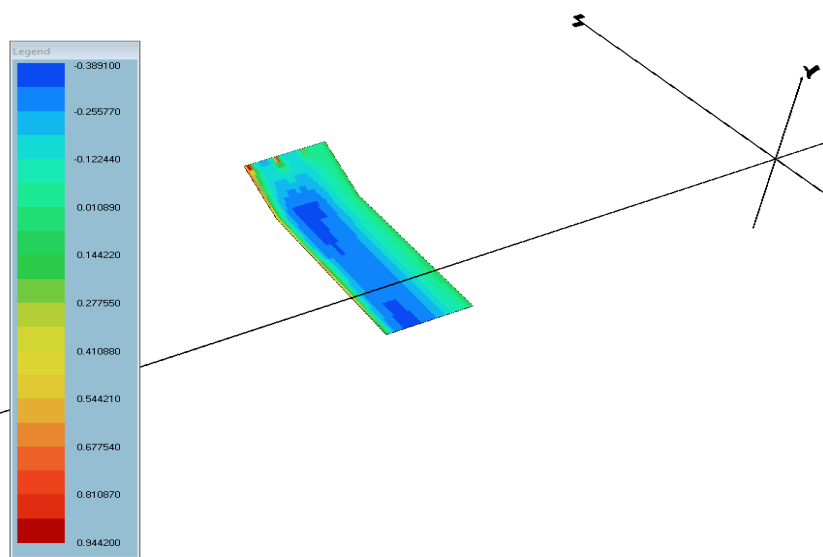


Рис. 5. Распределение давлений по верхней поверхности крыла

Расчеты КУ по описанным выше схемам выполнены с использованием программного комплекса ANSYS Mechanical методом конечных элементов. При создании конечно-элементных моделей (КЭМ) использовались элементы нескольких видов:

1. Для стержневой схемы КЭМ составлена из балочных двухузловых элементов типа BEAM191;
2. При составлении объемной КЭМ были использованы твердотельные 8-узловые элементы типа SOLID191 и пластинчатые 4-х узловые типа SHELL181. Общее число элементов и узлов равно 37791 и 100301 соответственно.

Общий вид конечно-элементных моделей кормового КУ при использовании стержневой схемы показан на рис.6, а при использовании объемной модели – на рис.7. В каждой модели стойки КУ считаются жестко заземленными на корпусе.

В стержневой модели вертикальные нагрузки приложены по нормали к несущим поверхностям, а горизонтальные силы приложены в местах соединения стоек с несущей поверхностью.

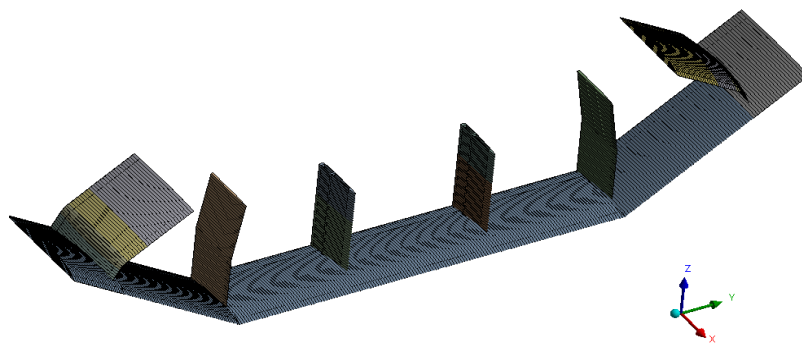


Рис.6. КЭМ стержневой схемы

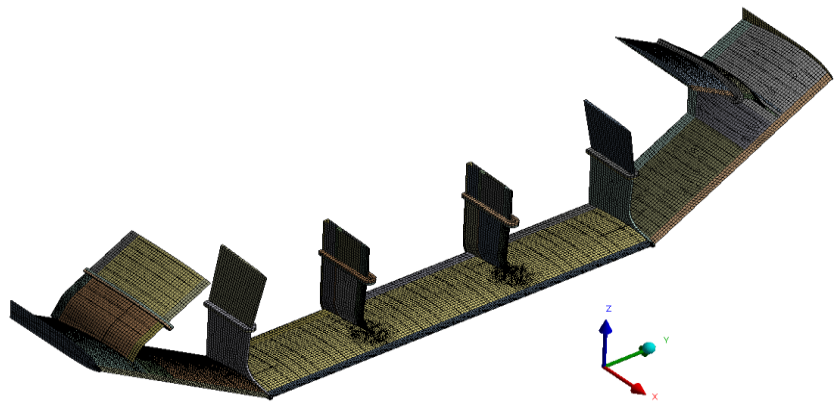


Рис.7. КЭМ объемной схемы

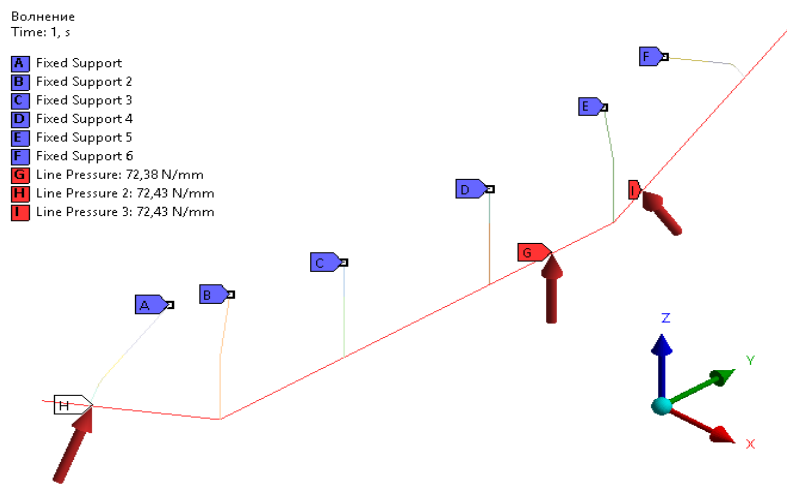


Рис.8. Характер закрепления и нагружения КУ по стержневой схеме на волнении

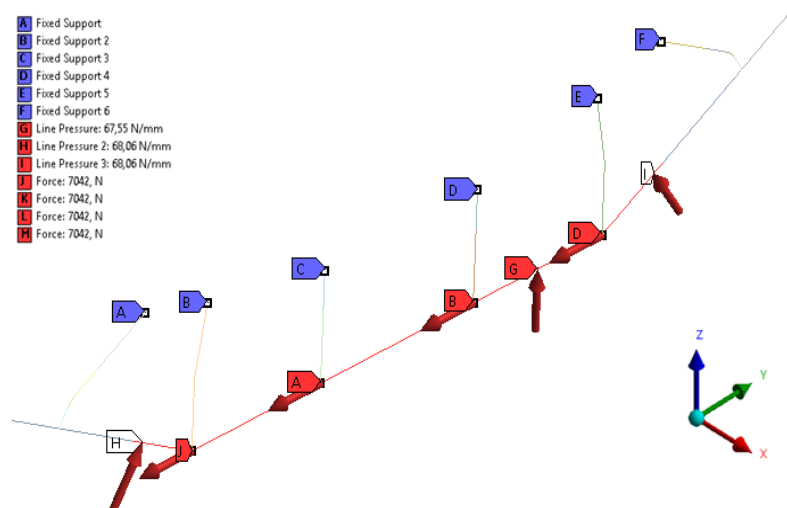


Рис.9. Характер закрепления и нагружения КУ по стержневой схеме на циркуляции

На рис.10 показан характер нагружения объемной модели усилиями, вычисленными в соответствии с ПККО. Из рис. 10 видно, что вертикальные силы заданы по отдельности на горизонтальную и наклонные плоскости, причем задаются они пропорционально погруженным площадям этих плоскостей. Следует отметить, что вертикальные силы распределены по рекомендации [7] на нижнюю и верхнюю части несущей поверхности в долях 40% и 60% соответственно.

На рис.11 и 12 показан характер нагружения объемной модели с использованием значений давлений, полученных с помощью комплекса AUTOWING.

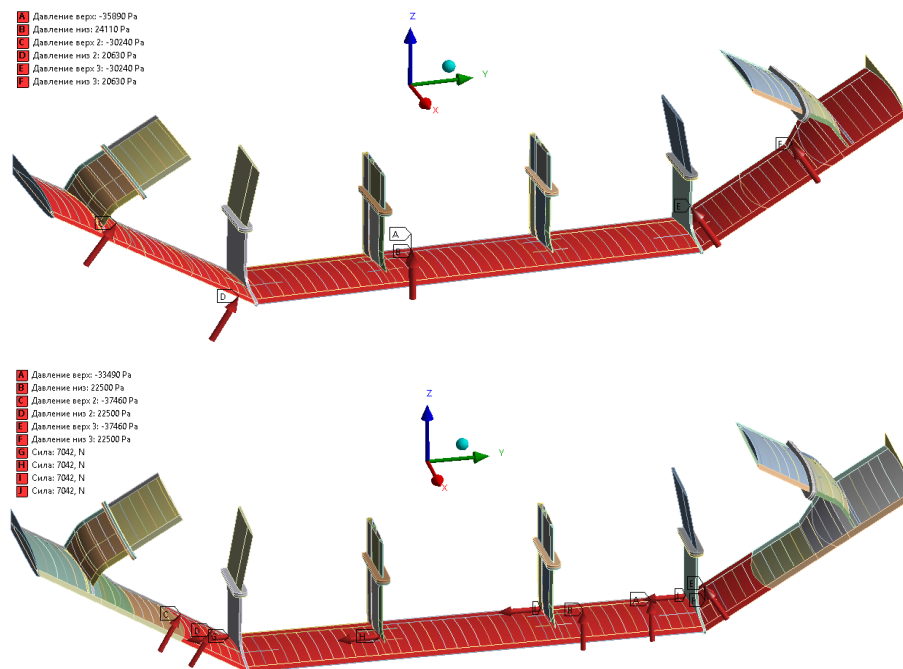


Рис. 10. Характер нагружения объемной модели по ПККО (волнение и циркуляция)

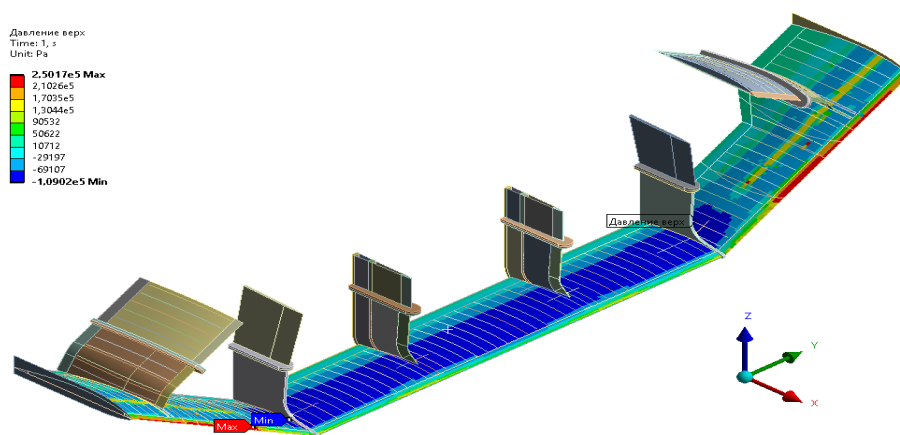


Рис. 11. Характер нагружения объемной модели давлениями, вычисленными с использованием AUTOWING на волнении

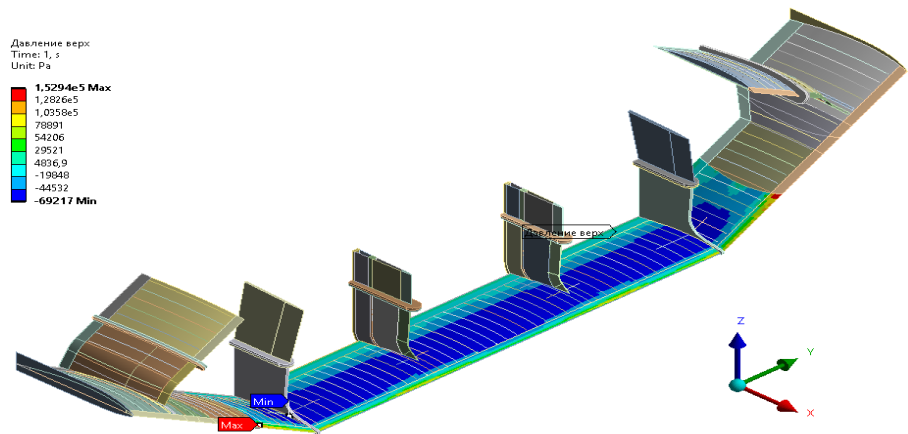


Рис 12. Характер нагружения объемной модели давлениями, вычисленными с использованием AUTOWING на циркуляции

Результаты расчетов кормового крыла

По результатам расчета получены картины напряженного состояния обеих схем для расчетных случаев волнения и циркуляции по ПРКО и на основании гидродинамического определения нагрузок по AUTOWING. Анализ результатов проводится по эквивалентным напряжениям Губера-Мизеса. Величины максимальных напряжений в элементах кормового крыльцевого устройства представлены в таблице 2; распределения полей эквивалентных напряжений для случая нагружения проиллюстрированы на рисунках 13-15.

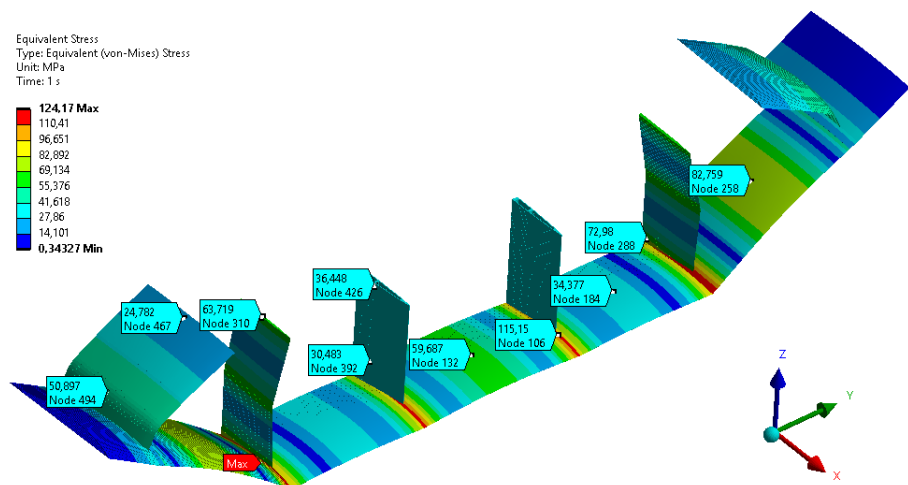


Рис.13. Эквивалентные напряжения стержневой схемы

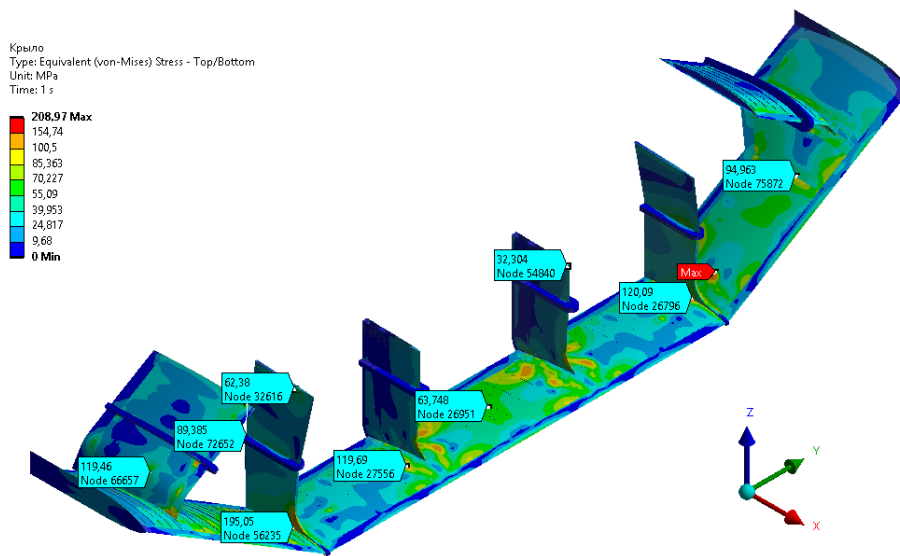


Рис. 14. Эквивалентные напряжения объемной схемы по ПРКО

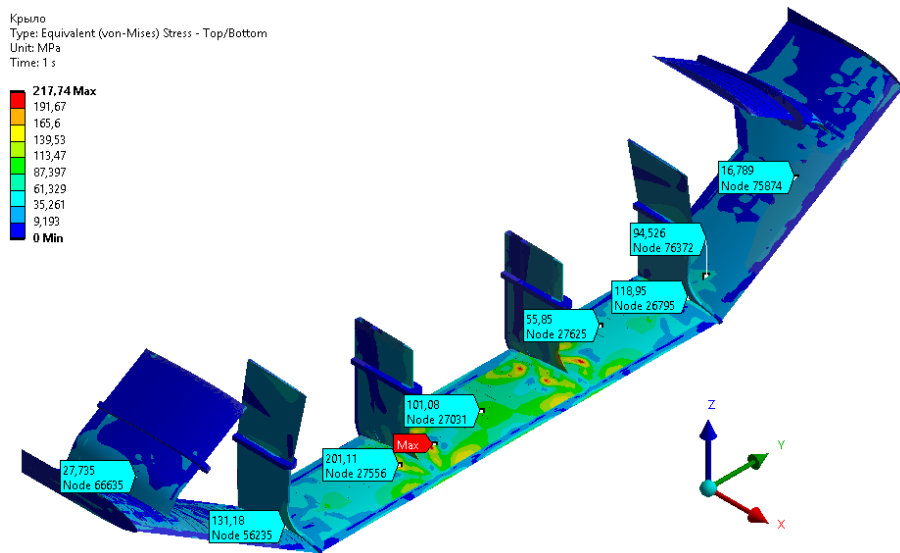


Рис. 15. Эквивалентные напряжения объемной схемы по AUTOWING

Как следует из представленных рисунков, картина распределения напряжений в кормовом КУ существенно отличается для стержневой и объемной схемы. Кроме того, имеется отличие в распределении напряжений для объемной схемы, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой в соответствии с Правилами РКО, и давлениями, вычисленными с использованием AUTOWING в силу сложного распределения последних по поверхности.

Максимальные напряжения в элементах кормового КУ, вычисленные по рассмотренным методикам, представлены в табл.2.

Таблица 2

Максимальные значения эквивалентных напряжений в элементах КУ

Элемент крыла	Методика вычисления нагрузок на КУ					
	Расчет по Правилами РКО [6]				AUTOWING	
	Стержневая схема		Объемная схема		Объемная схема	
	Волнение	Циркуляция	Волнение	Циркуляция	Волнение	Циркуляция
	σ_{max} , МПа					
Несущая плоскость	124	126	209	165	218	186
Стойка с водозабором	30	43	155	130	128	136
Днищевая стойка	73	76	144	75	74	43
Боковая стойка	51	50	118	44	75	25
Кронштейн с водозабором	36	36	49	59	55	41
Кронштейн днищевой	64	74	62	59	66	49
Кронштейн боковой	25	35	78	55	15	25

Заключение

В настоящей работе выполнены расчеты прочности двух вариантов расчетных схем кормового крыльцевого устройства СПК пр.03830, спроектированного фирмой «SeaTech», с помощью программного комплекса ANSYS. Конструкция крыла у данного судна является объемной, состоящей из обшивки, подкрепленной набором.

Для стержневой схемы нагрузки приняты в соответствии с рекомендациями, содержащимися в Правилах РКО [6]. Для объемной схемы рассмотрены варианты нагружения по ПРКО, а также нагрузки, вычисленные численными методами гидродинамики с использованием компьютерного пакета AUTOWING.

В результате выполненных расчетов показано, что для данной конструкции крыла стержневая схема, рекомендованная Правилами РКО, дает заниженные в 1.6 раза значения напряжений в наиболее нагруженных элементах КУ по сравнению с объемной схемой.

Максимальные напряжения в конструкции КУ вычисленные по объемной схеме с использованием нагрузок, рекомендованных в ПРКО и вычисленных с использованием пакета AUTOWING, отличаются незначительно. Однако, при этом напряжения в отдельных элементах КУ существенно отличаются.

Использование изложенного метода расчета, основанного на объемной конечно-элементной схеме, позволило сократить массу кормового КУ на 13% за счет рационального размещения металла в конструкции.

Список литературы

1. Вахитов М.Б. Расчет крыльцевых устройств судов на прочность. / М.Б. Вахитов, М.С. Сафариев, В.Ф. Снигирев. - Татарское книжное издательство, 1975 - 212 с.
2. Зиганченко П.П. Суда на подводных крыльях: конструкция и прочность. / П.П. Зиганченко, Б.П. Кузовенко, И.К. Тарасов. – Ленинград: изд-во «Судостроение», 1981 - 312 с.

3. Колызаев Б.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания / Б.А. Колызаев, А.И. Косоруков, В.А. Литвиненко – Ленинград: изд-во «Судостроение», 1980 - 472 с.
4. Кузовенков Б.П. Прочность быстроходных судов на подводных крыльях и воздушной подушке / Б.П. Кузовенко – Ленинград: изд-во «Судостроение», 1981 - 99 с.
5. Маттес Н.В. Прочность судов на подводных крыльях./ Н.В. Маттес, А.В. Уткин – Ленинград: изд-во «Судостроение», 1966 - 191с.
6. Российское Классификационное Общество. Правила классификации и постройки судов. Москва, 2022 - 1506с.
7. Российский Морской Регистр судоходства. Правила классификации и постройки высокоскоростных судов. Санкт-Петербург, 2023 - 123 с.
8. Гирин С. Н. Сопоставительный анализ требований правил Российского Речного Регистра и Российского морского регистра судоходства к конструкции и прочности судов на подводных крыльях / С.Н. Гирин // Научн. проблемы. водн. трансп. -2021. - №68(3) – С. 28 - 38. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi68.201>.
9. Болотин А.А. Применение метода дискретных вихрей для исследования подводных крыльев /А.А. Болотин // Труды Нижегород. гос. тех. унив. им. Р.Е. Алексеева – 2015. - №3(110) С. 210-213.
10. Корнев Н.В., Метод вихревых частиц и его приложение к задачам гидродинамики корабля: дисс. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук: 01.02.05: защищена 22.12.1998 / Корнев Николай Владимирович. - Санкт-Петербург. – 1998. - 254 с

References

1. Vakhitov M.B. Raschet kryl'evykh ustroystv sudov na prochnost'. / M.B. Vakhitov, M.S. Safariev, V.F. Snigirev. - Tatarskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1975 - 212 s.
2. Ziganchenko P.P. Suda na podvodnykh kryl'yakh: konstruktsiya i prochnost'. / P.P. Ziganchenko, B.P. Kuzovenko, I.K. Tarasov. – Leningrad: izd-vo «Sudostroenie», 1981 - 312 s.
3. Kolyzaev B.A. Spravochnik po proektirovaniyu sudov s dinamicheskimi prin-tsipami podderzhaniya / B.A. Kolyzaev, A.I. Kosorukov, V.A. Litvinenko – Leningrad: izd-vo «Sudostroenie», 1980 - 472 s.
4. Kuzovenkov B.P. Prochnost' bystrokhodnykh sudov na podvodnykh kryl'yakh i voz-dushnoi podushke / B.P. Kuzovenko – Leningrad: izd-vo «Sudostroenie», 1981 - 99 s.
5. Mattes N.V. Prochnost' sudov na podvodnykh kryl'yakh./ N.V. Mattes, A.V. Utkin – Leningrad: izd-vo «Sudostroenie», 1966 - 191s.
6. Rossiiskoe Klassifikatsionnoe Obshchestvo. Pravila klassifikatsii i po-stroiki sudov. Moskva, 2022 - 1506s.
7. Rossiiskii Morskoi Registr sudokhodstva. Pravila klassifikatsii i po-stroiki vysokoskorostnykh sudov. Sankt-Peterburg, 2023 - 123 s.
8. Girin S. N. Sopostavitel'nyi analiz trebovaniy pravil Rossiiskogo Rechnogo Registra i Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva k konstruktсии i prochnosti sudov na podvodnykh kryl'yakh / S.N. Girin // Nauchn. problemy. vodn. трансп. -2021. - №68(3) –С. 28 - 38. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi68.201>.
9. Bolotin A.A. Primenenie metoda diskretnykh vikhrei dlya issledovaniya podvodnykh kryl'ev /A.A. Bolotin // Trudy Nizhegorod. gos. tekhn. univ. im. R.E. Alekseeva – 2015. - №3(110) С. 210-213.
10. Kornev N.V., Metod vikhrevykh chastits i ego prilozhenie k zadacham gidrodina-miki korablya: diss. na soisk. uch. st. dokt. tekhn. nauk: 01.02.05: zashchishchena 22.12.1998 / Kornev Nikolai Vladimirovich. - Sankt-Peterburg. – 1998. - 254 s

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гирин Станислав Николаевич, к.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 e-mail: girin.sn@vsuwt.ru

Girin Stanislav Nikolaevich, Ph.D. in Engineering Science, Professor, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603950, e-mail: girin.sn@vsuwt.ru

Гусев Александр Сергеевич, аспирант кафедры «Теории конструирования инженерных сооружений», Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: gususev@yandex.ru

Gusev Alexander Sergeevich, graduate student of the Department of «Theory of engineering structures design», Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: gususev@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10.04.2024; опубликована онлайн 20.06.2024.
Received 10.04.2024; published online 20.06.2024.