

- v gosudarstvennom regulirovanii vodnogo turizma, Zhurnal «Ekonomika i predprinimatel'stvo», №7, 2019 g., str. 519-524.
5. Reshnyak V.I., Reshnyak K.V., Morozova E.M., *Ekologicheskaya bezopasnost' vodnogo turizma, Sbornik nauchnyh statej nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova», SPb, 2019 g., Tom 3, Str. 84-90.*
  6. Kalyaush A.I. *Razrabotka kompleksa specializirovannyh sudov i ih SEU dlya ochistki neftesoderzhashchej podslanevoj vody: dis. ... kand. tekhn. nauk; special'nost': 05.08.05— sudovye energeticheskie ustanovki i ih elementy (glavnye i vspomogatel'nye) / A.I. Kalyaush. —SPb.: FGBOU VO GUIRF imeni admirala S.O. Makarova, 2016. — 157 s.*
  7. Reshnyak V. I. *Sistema upravleniya ekologicheskoy bezopasnost'yu pri ekspluatatsii sudov na vnutrennih vodnyh putyah: monografiya / V. I. Reshnyak. — SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2017. — 148 s.*
  8. Reshnyak V. I. *Teoreticheskie osnovy tekhnologii peremeshcheniya podslanevoj vody, obrazuyushchejsya pri ekspluatatsii sudovyh energeticheskikh ustanovok / V. I. Reshnyak, A. I. Kalyaush, A. N. Grigor'ev // Vestnik AGTU. — Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. — 2016. — № 2. — S. 70–76.*
  9. Reshnyak V.I., Reshnyak K.V., Kurnikov A.S., *Kinetika processov glubokoj ochistki neftesoderzhashchej podslanevoj vody okisleniem, Zhurnal uni-versiteta vodnyh kom-munikacij, №7, 2010 g. S. 171-178.*

УДК 629.5.035.8

DOI: 10.34046/aumsuomt98/12

## О МЕТОДИКЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГРЕБНОГО ВАЛА СУДНА

*М.Н. Чура, кандидат технических наук*

В статье рассмотрена предложенная автором методика прогнозирования начальной стадии усталостного разрушения гребного вала судна, состоящая из следующих этапов: 1) «подготовительный» - определение исходных данных расчета, 2) «предрасчетный» - численное моделирование, 3) «расчетный» - прогнозирование начальной стадии усталостного разрушения. 4) «заключительный» - анализ результатов расчета и интерпретация полученных данных. Подготовительный этап состоит из: определения геометрических параметров и механических свойств гребного вала; изучения особенностей эксплуатации, технологии изготовления и технического состояния; изучения режима нагружения и значений действующих прогнозируемых нагрузок; анализа необходимости введения дополнительных нагрузок, исходя из условий эксплуатации и расчета значения действующих непрогнозируемых нагрузок; проверки на наличие исходных концентраторов напряжений. Предрасчетный этап состоит из: построения пространственной геометрической модели; задания характеристик материала и создание твердотельной модели; построения конечно-элементной модели путем дискретизации внутреннего пространства сеткой расчетных элементов конечного объема; задания граничных условий; анализа полученных результатов расчета путем определения «опасных» точек и значений напряжения и деформации в этих точках. Расчетный этап состоит из: определения значения критической длины трещины; определения третьей стадии усталостного разрушения; определения общей долговечности на основе уравнения регрессии усталостного разрушения материала; непосредственно расчета продолжительности начальной стадии усталостного разрушения. Заключительный этап состоит в анализе результатов расчета и интерпретации полученных данных.

**Ключевые слова:** усталостное разрушение, прогнозирование долговечности, судовой валопровод, гребной вал

## ON THE METHOD OF PREDICTING THE INITIAL STAGE OF FATIGUE FAILURE OF A SHIP'S PROPELLER SHAFT

*M.N. Chura*

The article considers the method of forecasting the initial stage of fatigue failure of the propeller shaft of the vessel, consisting of the following stages: 1) «preparatory» - determination of the initial calculation data, 2) «pre-calculation» - numerical modeling, 3) «calculation» - prediction of the initial stage of fatigue failure. 4) «final» - analysis of the calculation results and interpretation of the received data. The preparatory stage consists of: determining the geometric parameters and mechanical properties of the propeller shaft; studying the features of operation, manufacturing technology and technical condition; study of the loading mode and the values of the current predicted loads; Analysis of the need to introduce additional loads, based on the operating conditions and calculation of the value of the current unpredictable loads; checking for the presence of initial stress concentrators. The pre-calculation stage consists of: building a spatial geometric model; setting the material characteristics and creating a solid-state model; building a finite-element model by discretizing the internal space

with a grid of calculated elements of finite volume; setting boundary conditions; analysis of the obtained calculation results by determining the «dangerous» points and the values of stresses and deformations at these points. The calculation stage consists of: determining the value of the critical crack length; determining the third stage of fatigue failure; determining the total durability based on the regression equation of the fatigue failure of the material; directly calculating the duration of the initial stage of fatigue failure. The final stage is to analyze the calculation results and interpret the data obtained.

**Keywords:** fatigue failure, the prediction of durability, ships propeller shaft, propeller shaft.

В обеспечении безопасности судоходства немалую роль играет вопрос надежности и долговечности основных конструктивных элементов судна. Большинство конструктивных элементов и само судно испытывают в процессе эксплуатации знакопеременные механические нагрузки, что обусловлено влиянием морского волнения или цикличностью работы агрегатов и является условием для образования и последующего развития трещинообразных дефектов усталостного характера. Таким конструктивным элементом является судовая валопровод, который состоит из ряда промежуточных и концевой (гребного) вала. Прогнозирование процесса развития усталостного повреждения судового гребного вала является важной задачей в обеспечении безопасности судоходства, ввиду возможности предотвращения его разрушения, что может сопровождаться потерей гребного винта и, как следствие, привести к потере судном хода и управляемости, что, безусловно, подпадает под понятие «авария».

Ранее автором уже рассматривались вопросы, связанные с аспектами определения продолжительности начальной стадии усталостного разрушения, но с точки зрения только математических аспектов. Для применения описанной автором ранее математической модели [1, 2] оценки начальной стадии усталостного разрушения может быть предложена методика прогнозирования долговечности судового гребного вала, которая состоит из следующих основных этапов: подготовительный, предрасчетный, расчетный и заключительный.

Подготовительный этап прогнозирования долговечности гребного вала заключается в определении исходных данных расчета, таких как геометрические параметры и механических свойств

материала исследуемого гребного вала. Важными аспектами этого этапа является изучение особенностей эксплуатации, технологии изготовления, технического состояния (наличие дефектов усталостного или иного характера) исследуемого гребного вала судна. Особенности эксплуатации определяются путем изучения режима нагружения исследуемого гребного вала судна, определения значений действующих прогнозируемых нагрузок и анализа необходимости введения дополнительных нагрузок, исходя из условий эксплуатации. Помимо действующих прогнозируемых (систематических) нагрузок на этом этапе необходимо определить значения действующих непрогнозируемых (случайных) нагрузок. К систематическим нагрузкам относятся: крутящий момент от главного двигателя; силы тяжести валов, фланцев, полумуфт и др.; сила упора, передаваемая от гребного винта; гидродинамический момент на гребном винте, связанный с неравномерностью поля скоростей набегающего потока воды; контактное давление в месте посадки винта на вал; изгибающие моменты, возникающие в связи с упругой деформацией корпуса судна. К случайным нагрузкам относятся: изгибающие моменты и реакции на опорах, связанные с монтажными искривлениями валопровода; изгибающие моменты и реакции на опорах, связанные с износом трущихся подшипниковых пар; изгибающие моменты и реакции на опорах, связанные с упругой деформацией корпуса на волнении; нагрузки от неуравновешенности валов, муфт и т.п.; силы инерции поперечной и продольной качки судна; динамические нагрузки при столкновениях корпуса или гребного винта. Пример условий нагружения гребного вала приведен на схеме (рис. 1).

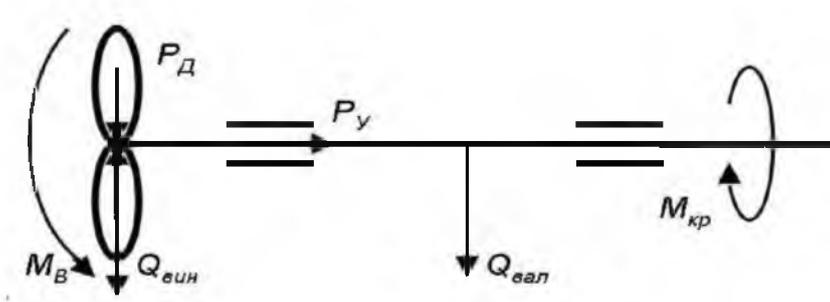


Рисунок 1 – Схема нагружения гребного вала

Оценка технического состояния заключается в проверке вала на наличие исходных концентраторов напряжений, влияние которых должно быть учтено при прогнозировании долговечности гребного вала судна.

Предрасчетный этап – численное модели-

рование. Заключается в построении пространственной геометрической модели исследуемого гребного вала судна, задании характеристик материала и создании твердотельной модели. Для примера взят гребной вал судна т/х «Волгонефть 113» (рис. 2). Твердотельная модель гребного вала показана на рисунке 3.

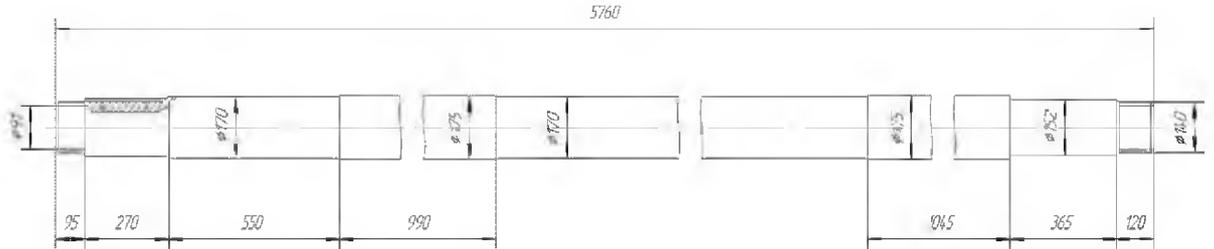


Рисунок 2 - Чертеж гребного вала т/х «Волгонефть 113»

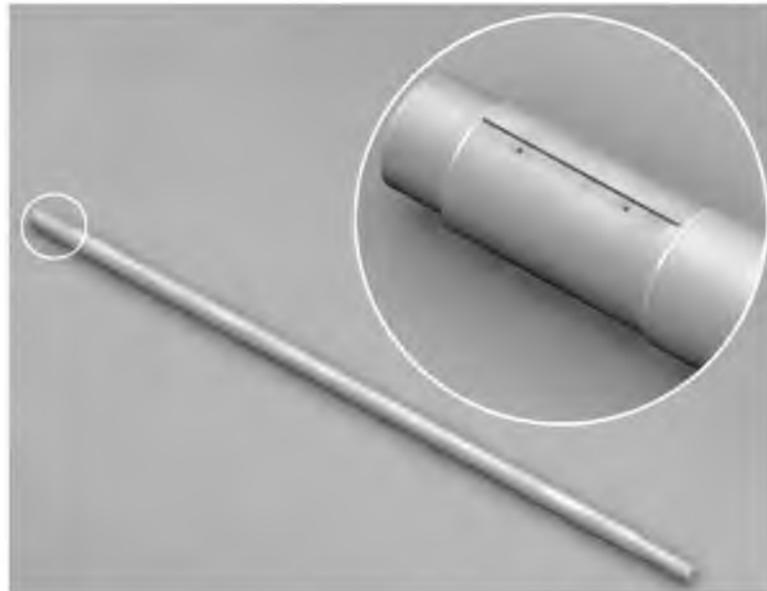


Рисунок 3 – Трехмерная модель гребного вала т/х «Волгонефть 113»

Следующим действием этапа численного моделирования является построение конечно-элементной модели гребного вала, путем дискретизации внутреннего пространства твердотельной модели вала сеткой расчетных элементов конечного объема, соединенных между собой в узловых точках. Например, пространственная модель вала была разбита на конечное число пространственных тетраэдров, аппроксимируемых параболическими функциями (рис. 4). Это преобразование эквивалентно замене непрерывной расчетной модели [3, 4], дискретным «сеточным» аналогом с конечным числом параметров в вершинах (узлах) пространственных расчетных элементов. Результат преобразования позволил свести решение задачи теории упругости к решению системы линейных алгебраических уравнений высокого порядка.

Дальнейшее действие заключается в приложении ранее определенных прогнозируемых и непрогнозируемых нагрузок (задание граничных условий) и проведение расчета. В результате расчета определяется напряженно-деформированное состояние. Пример подобного расчета приведен на рисунке 5.

Завершением второго этапа прогнозирования можно считать анализ полученных результатов программного расчета, определение наиболее «опасных» точек, значения напряжений и деформаций в этих точках. Результаты расчета, выполненные на примере гребного вала т/х «Волгонефть», показали, что наибольшие напряжения возникают в районе кромки кормовой облицовки, конуса посадки гребного винта и шпоночного паза, что согласуется со статистическими данными РМРС [5].

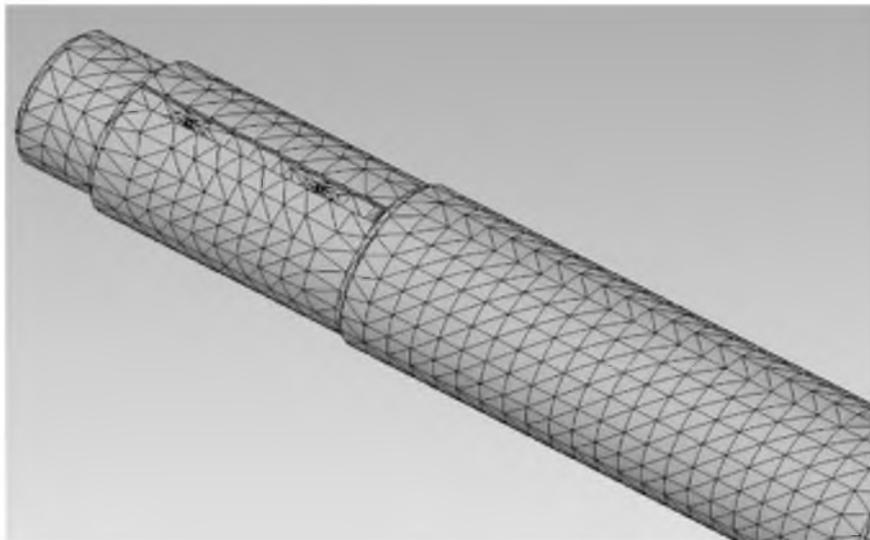


Рисунок 4 – Построение сетки конечных элементов

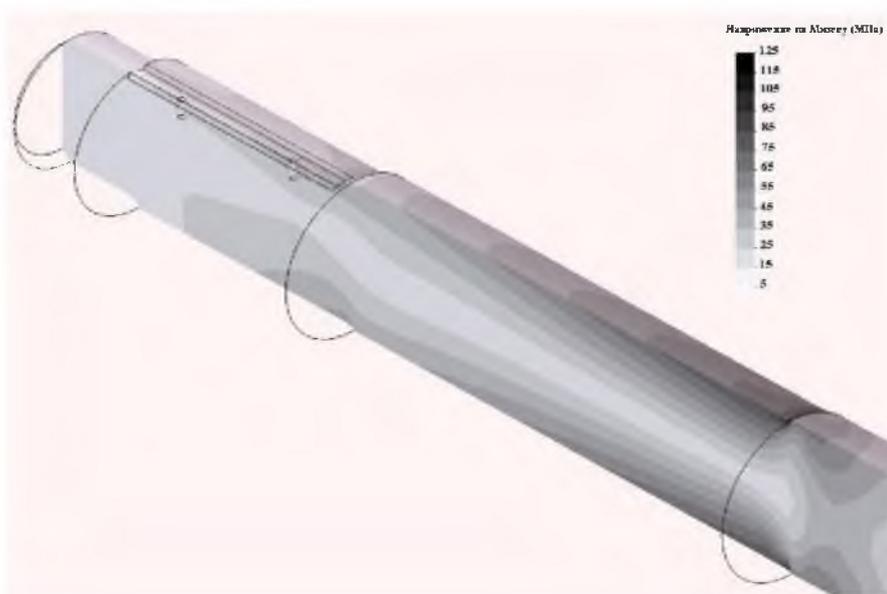


Рисунок 5 - Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в продольном сечении вала

Третий этап методики – «расчетный» заключается в прогнозировании начальной стадии усталостного разрушения: определение значения критической длины трещины  $l_{кр}$ , предшествующего полному разрушению образца:

$$l_{кр} = \lambda \pi a,$$

где  $\lambda$  – относительная длина трещины по поверхности образца, определяется из уравнения:

$$Y = 6\lambda^{1/2}(1,87 - 3,27\lambda + 8,29\lambda^2),$$

при выполнении условия  $0,16 \leq \lambda \leq 0,5$ .

здесь  $Y$  – безразмерный коэффициент, зависящий от относительного размера трещины, определяемый по формуле [6]:

$$Y = \frac{K_{Ifc}}{\sigma_{max} d^{1/2}},$$

где  $K_{Ifc}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений (для материала сталь 35  $K_{Ifc} = 26,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  [7]).

Кроме того, на третьем этапе прогнозирования выполняются и другие расчеты. Определение продолжительности третьей стадии усталостного разрушения по формуле:

$$N_{III} = \int_{10d_{cp}}^{l_{кр}} \frac{dl}{f(\Delta K_I)},$$

где  $f(\Delta K_I)$  – функция от размаха коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K_I$ , определяется исходя из условий нагружения и геометрии образца;

$l_{кр}$  - критический размер трещины, предшествующий моменту полного разрушения образца.

Определение общей долговечности на основе уравнения регрессии усталостного разрушения данного конструкционного материала:

$$N = a\sigma_{max}^b.$$

Непосредственно расчет продолжительности начальной стадии усталостного разрушения гребного вала, на основе формулы определения средней скорости роста малой трещины:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{10d_{cp}}{a\sigma_{max}^b - a_1\sigma_{max}^{b_1} - \int_{10d_{cp}}^{l_{кр}} \frac{dl}{f(\Delta K_1)}}.$$

Заключительный этап методики прогнозирования долговечности судового гребного вала с трещиной заключается в анализе результатов расчета и интерпретации полученных данных.

Алгоритм расчета продолжительности начальной стадии усталостного разрушения может быть представлен в виде блок-схемы (рис. 6):

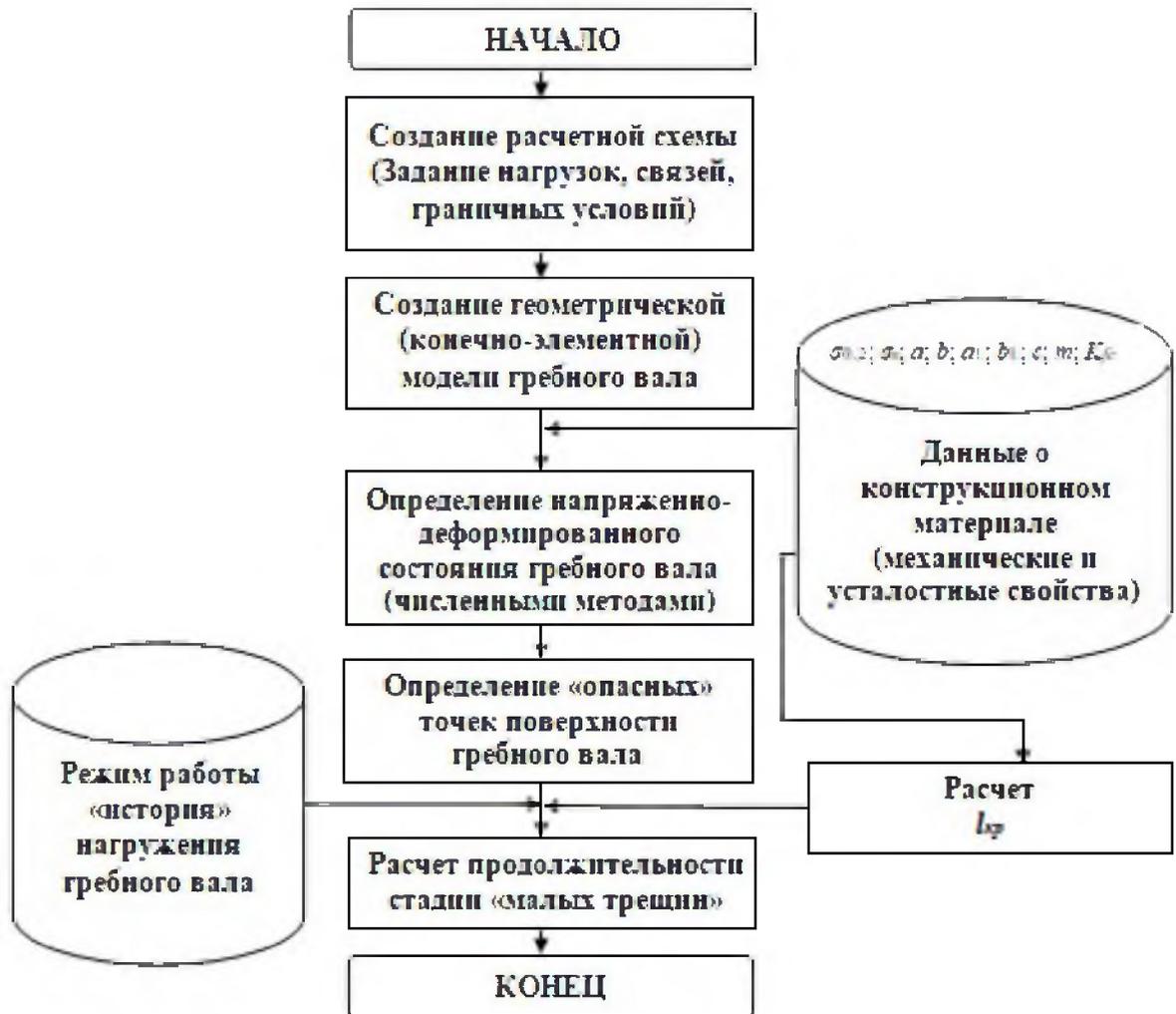


Рисунок 6 – Алгоритм расчета начальной стадии усталостного разрушения гребного вала

Итогом расчетов по предложенной методике является прогностическая оценка продолжительности начальной стадии усталостного разрушения, т.е., в практической интерпретации, – эксплуатационного ресурса судового гребного вала, выраженная в количестве циклов нагружения. При этом параметры цикла будут зависеть от нагрузок, заложенных в расчетную модель в качестве исходных данных.

Вместе с тем, полученные результаты будут выражены в циклах максимальной нагрузки.

В целях определения продолжительности начальной стадии усталостного разрушения гребных валов, выраженной в часах наработки, необходимо использование дополнительной определенной методики перевода. Данная методика может быть основана на анализе статистических данных режимов работы гребного вала конкретного судна. Разработка такой методики требует индивидуального подхода к объекту исследования, проведения большой серии натурных испытаний и может

являться самостоятельной перспективной научной и практической задачей. В рамках данной статьи подобная методика не рассматривалась.

В результате проделанной работы автором предложена и подробно описана методика прогнозирования долговечности судового гребного вала. Данная методика позволяет определить продолжительность начальной стадии его усталостного разрушения (до возникновения макротрещины) в зависимости от условий эксплуатации. При конкретизации параметров нагружения и режимов работы, методика позволит оценить наработку гребного вала судна в целях обеспечения безопасности мореплавания.

#### Литература

1. Чура М.Н. К оценке усталостной прочности материалов судовых валопроводов // Эксплуатация морского транспорта – 2019. – № 4 (93). с. 115 – 122.
2. Чура М.Н., Файвисович А.В. К оценке эксплуатационного ресурса судовых гребных валов // Эксплуатация морского транспорта – 2020. – № 3 (96). с. 123 – 127.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир. – 1979. – 390 с., ил.
4. Победра Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Изд-во МГУ. – 1995. – 366 с.
5. Яценко В.С. Эксплуатация судовых валопроводов. – М.: Транспорт – 1968. – 171 с.
6. Файвисович А.В. Прогнозирование усталостного разрушения конструктивных элементов. Диссертация доктора техн. наук. – Новороссийск, 1996. – 346 с.

7. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. / Под общей ред. Панасюка В.В. Т. 3: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения / Ковчик С.Е., Морозов Е.М. – Киев: Наук. думка, 1988. – 436 с.

#### Литература

1. Чура М.Н. К оценке усталостной прочности материалов судовых валопроводов // Эксплуатация морского транспорта – 2019. – № 4 (93). с. 115 – 122.
2. Чура М.Н., Файвисович А.В. К оценке эксплуатационного ресурса судовых гребных валов // Эксплуатация морского транспорта – 2020. – № 3 (96). с. 123 – 127.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир. – 1979. – 390 с., ил.
4. Победра Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Изд-во МГУ. – 1995. – 366 с.
5. Яценко В.С. Эксплуатация судовых валопроводов. – М.: Транспорт – 1968. – 171 с.
6. Файвисович А.В. Прогнозирование усталостного разрушения конструктивных элементов. Диссертация доктора техн. наук. – Новороссийск, 1996. – 346 с.
7. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. / Под общей ред. Панасюка В.В. Т. 3: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения / Ковчик С.Е., Морозов Е.М. – Киев: Наук. думка, 1988. – 436 с.

УДК 629.5.017

DOI: 10.34046/aumsuomt98/13

## ПОВЫШЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРА РУЛЯ СУДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ

*Д.И. Осовский, кандидат технических наук, доцент,  
А.С. Шаратов, кандидат технических наук, доцент  
А.Н. Горбенко, кандидат технических наук, доцент  
С.Х. Шмелев, кандидат технических наук, доцент*

Проблема снижения маневренности при понижении скорости хода является актуальной для современных транспортных судов. Необходимость маневра при малой скорости хода, характеризующейся пониженной боковой силой пера руля требует достижения предельных углов отклонения рулевой поверхности, что в свою очередь приводит к срыву потока и относительному уменьшению поворачивающего момента. Известны различные методы повышения подъемной силы на пера руля, одним из которых является метод управления пограничным слоем, хорошо зарекомендовавший себя в авиации, и предназначенный для ускорения и плавного обтекания засасывающей поверхности пера руля. В системах управления пограничным слоем, основной эффект образуется за счет обеспечения плавного ускоренного течения жидкости на руле, без отрыва потока, что определяется максимумом эффективности вылива жидкости, необходимой для создания плавного обтекания, а также повышения циркуляции скоро-