

УДК 621.74:624.012
EDN CREIVW

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ РУЛЕЙ ИЗМЕНЯЕМОГО ПРОФИЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ, ПОВЫШАЮЩЕЕ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

В.О. Бессонова, аспирант, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: bessonchik99@gmail.com

А.П. Аносов, д-р техн. наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: anosov49@mail.ru

Рули изменяемого профиля, то есть снабженные в общем случае закрылком и предкрылком, обладают существенно большей эффективностью, чем обычные рули. Известные конструкции таких рулей обладают рядом недостатков, несовершенств и накладывают конструктивно обусловленные ограничения на их технические характеристики. В статье представлены две новые конструкции рулей изменяемого профиля, отличающиеся оригинальными приводами для управления подвижными элементами пера руля, а также устройство, улучшающее гидродинамические характеристики руля изменяемого профиля. Эти технические решения устраняют значительную часть имеющихся недостатков.

Ключевые слова: управляемость судна, гидродинамические характеристики руля, руль изменяемого профиля, привод подвижных частей пера руля.

Для цитирования: Бессонова В.О. Новые конструкции рулей изменяемого профиля и техническое решение, повышающее их эффективность / В.О. Бессонова, А.П. Аносов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 50 — 63. EDN CREIVW.

THE NEW CONSTRUCTION OF THE VARIABLE PROFILE RUDDERS AND A TECHNICAL SOLUTION FOR INCREASING EFFICIENCY

В.О. Бессонова, PhD student, Far Eastern Federal University, 690922 Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax Bay, 10, e-mail: bessonchik99@gmail.com

А.П. Аносов, DSc, Professor, Far Eastern Federal University, 690922 Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax Bay, 10, e-mail: anosov49@mail.ru

The rudders of variable profile, such as equipped with a flap and a pre-flap, have essentially higher efficiency than traditional rudders. Known designs of flap rudders have a few disadvantages, imperfections and impose constructive limitations on their technical characteristics. The article presents two new designs of rudders of variable profile, characterized by original actuators for controlling the moving elements of the rudder, as well as a device that improves the hydrodynamic characteristics of the rudder of variable profile. These technical solutions eliminate a significant part of the existing defects.

Key words: maneuverability of a ship, hydrodynamic characteristics of a rudder, variable profile rudder, flap rudder, actuator of moving elements of a rudder.

For citation: Bessonova V.O., Anosov A.P. The new construction of the variable profile rudders and a technical solution for increasing efficiency. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 50 — 63. EDN CREIVW. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы управляемости судов и результаты исследований технических характеристик традиционных судовых рулей исчерпывающе освещены в специальной литературе, например [1 — 3].

Рули изменяемого профиля, то есть по аналогии с авиационными крыльями и крыльями динамических успокоителей качки [4, 5] снабженные в общем случае закрылком и предкрылком, обладают существенно большей эффективностью, чем обычные рули. Несмотря на это, информация об их практическом использовании, конструктивных особенностях и технических характеристиках в научной и технической литературе практически отсутствует за исключением кратких упоминаний рулей с закрылками в интернет-ресурсах, в основном в качестве рекламы (рис. 1).



Рис. 1. Рули изменяемого профиля с закрылком: *а* — руль Becker; *б* — руль Heracles

В департаменте морской техники и транспорта Политехнического института ДВФУ разработано несколько конструкций рулей изменяемого профиля, защищенных патентами на изобретения и полезные модели, например [6 — 10], часть из которых, кроме отклоняемого закрылка, включает отклоняемый предкрылок (в авиационной терминологии — отклоняемый носок), что дополнительно повышает эффективность руля. Применительно к судам ледового плавания выполнены некоторые исследования гидродинамических характеристик рулей изменяемого профиля [11, 12].

Конструкция механизмов поворота подвижных частей руля в зависимости от угла перекладки основной части должна быть максимально простой по конструкции и по возможности не требующей дополнительного привода. В статье приведено описание новых конструкций таких механизмов, разработанных с учетом отдельных недостатков известных конструкций. Поданы заявки на патентование этих конструкций.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИЗВЕСТНЫХ РУЛЕЙ ИЗМЕНЯЕМОГО ПРОФИЛЯ

Принцип действия наиболее эффективного руля, снабженного поворотными закрылком и предкрылком, состоит в следующем. При перекладке основной части руля автоматически с помощью того или иного механизма осуществляется поворот закрылка и предкрылка. При этом должно обеспечиваться оптимальное с точки зрения наибольшей эффективности руля соотношение улов поворота всех его частей.

На рис. 2 показано устройство руля изменяемого профиля, снабженного только закрылком [5] (в литературе упоминаются рули только этого типа). За счет выбора параметров механизма поворота закрылка оптимизирован угол его поворота в зависимости от угла перекладки основной части.

Принцип действия механизма поворота закрылка очевиден из рис. 2б. Наилучшее с точки зрения наибольшей эффективности руля соотношение угла перекладки основной части руля и угла поворота закрылка относительно основной части обеспечивается определенным расстоянием от точки крепления румпеля к закрылку до закрепленной на корпусе поворотной опорной втулки, сквозь которую румпель проходит.

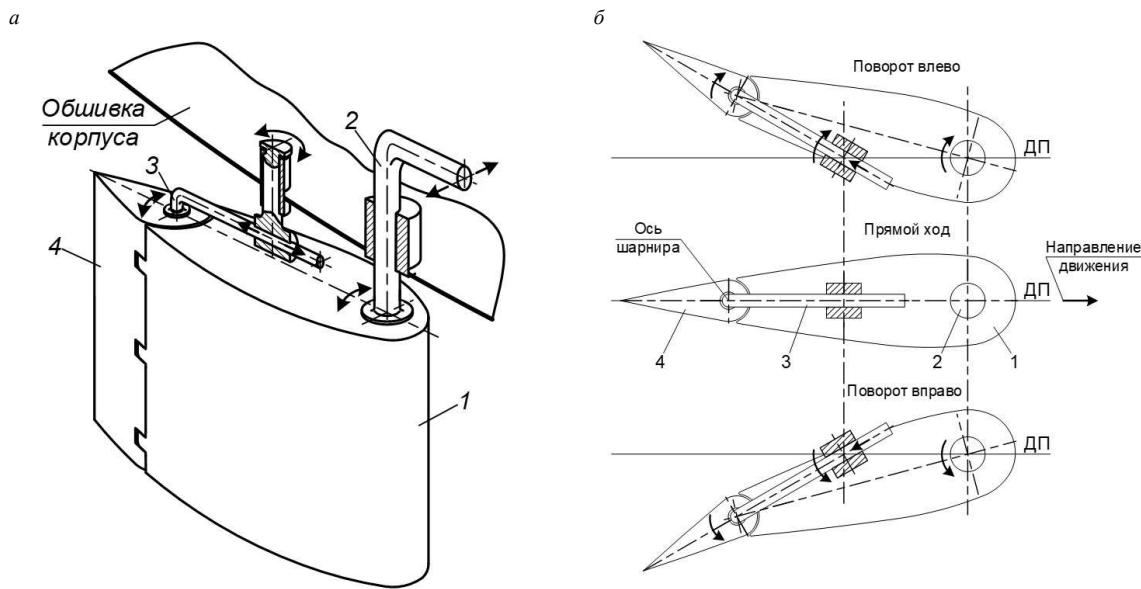


Рис. 2. Руль изменяемого профиля [6]: а — общий вид; б — принцип действия механизма поворота закрылка; 1 — основная часть руля; 2 — баллер; 3 — румпель закрылка; 4 — закрылок

Недостатком этого рулевого устройства является то, что при повороте в сторону любого борта независимо от направления движения (передним или задним ходом) профиль руля принимает форму, наиболее эффективную при движении передним ходом. При движении задним ходом такая форма руля по отношению к набегающему с кормы потоку наименее эффективна, и ее эффективность ниже, чем у обычного руля с неизменяемой формой профиля. Снижение управляемости усугубляется тем, что при движении задним ходом судно всегда хуже «слушается» руля из-за пониженной скорости движения.

Данный недостаток устранен в рулевом устройстве, представленном в [9] (рис. 3). Это достигается тем, что вертикальная ось поворота опорной втулки, которая в предыдущем устройстве неподвижно закреплена в диаметральной плоскости (ДП), в данном случае имеет возможность управляемого смещения в ту и другую сторону от ДП, что и дает возможность создавать необходимую, оптимальную при каждом маневре, кривизну профиля руля (рис. 3б, в).

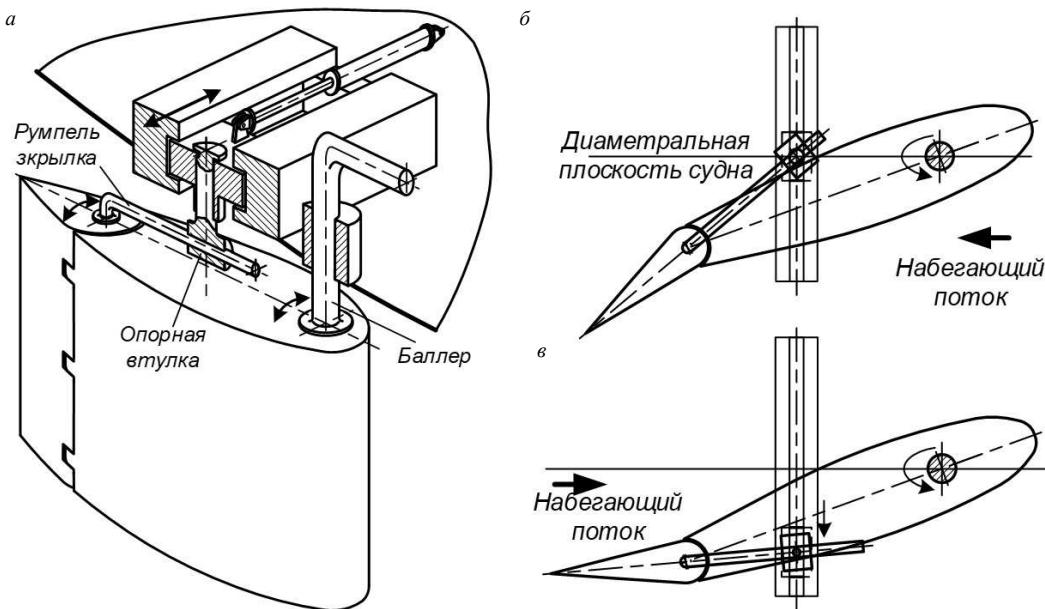


Рис. 3. Руль изменяемого профиля [9]: а — общий вид; принцип действия механизма поворота закрылка: б — передний ход, поворот в сторону правого борта; в — задний ход, поворот в сторону правого борта

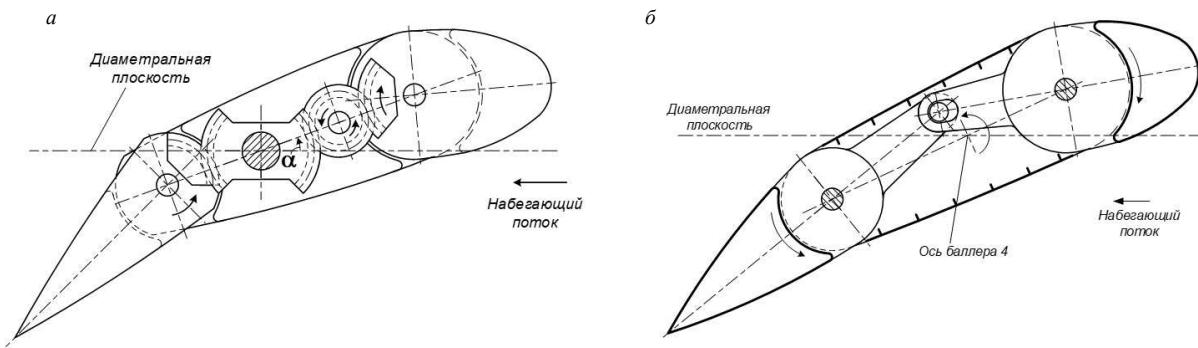


Рис. 4. Зубчатый (а) [8] и рычажный (б) [7] приводы поворота предкрылка

Поворот предкрылка осуществляется дополнительной механической передачей, связывающей его с закрылком. Величина углов поворота закрылка и предкрылка также взаимно обусловлена из соображений максимальной эффективности руля и определяется конструктивными параметрами передачи.

Различные механизмы, связывающие закрылки и предкрылки, основаны в большинстве случаев на двух механических передачах — зубчатой и рычажной (рис. 4).

Принцип действия обоих механизмов очевиден из рисунка и не требует особых комментариев. При этом оба устройства имеют конструктивно обусловленные недостатки.

Достоинство данного зубчатого привода заключается в том, что нет необходимости в отдельном приводе для закрылка: и закрылок, и предкрылок поворачиваются независимо друг от друга в зависимости от перекладки основной части руля.

Недостаток этого механизма состоит в том, что зубчатый элемент привода, ось которого совпадает с осью баллера (на рис. 4а заштрихован), должен быть жестко закреплен на неподвижной опоре, в данном случае на пятке ахтерштевня. В силу этой особенности все зубчатые элементы передачи открыто расположены ниже пера руля, работают в морской воде и не защищены от возможных внешних воздействий.

Рычажный привод (рис. 4б) конструктивно прост и находится во внутренней полости основной части руля, то есть надежно защищен. Однако это достоинство в определенных обстоятельствах создает непреодолимую проблему. Если руль имеет тонкий профиль, это может недопустимо ограничить возможный поворот рычагов и, значит, углы отклонения закрылка и предкрылка.

Целью работы является разработка таких рулей изменяемого профиля, которые лишены указанных недостатков. Ниже приведено описание разработанных конструкций двух рулей, в которых приводы поворота закрылка и предкрылка компактны и надежно защищены. В обоих случаях с помощью устройства, описанного в [9], первоначально осуществляется необходимый поворот закрылка, в зависимости от которого посредством одного из двух рассматриваемых устройств обеспечивается соответствующий поворот предкрылка.

Кроме того, разработано устройство, улучшающее гидродинамические качества руля за счет предотвращения срыва потока при больших углах перекладки руля.

ПЕРО РУЛЯ С ВНУТРЕННИМ ЗУБЧАТЫМ ПРИВОДОМ ПОВОРОТА ПРЕДКРЫЛКА

Рулевое устройство разработано на основе синтеза двух известных технических решений. Первое из них — руль с закрылком с возможностью обеспечения формы профиля, оптимальной при движении как передним, так и задним ходом [9] (рис. 3), второе — руль с закрылком и предкрылком с зубчатыми приводами поворота того и другого в зависимости от угла перекладки основной части руля [7] (рис. 4а).

Конструкция нового рулевого устройства показана на рис. 5.

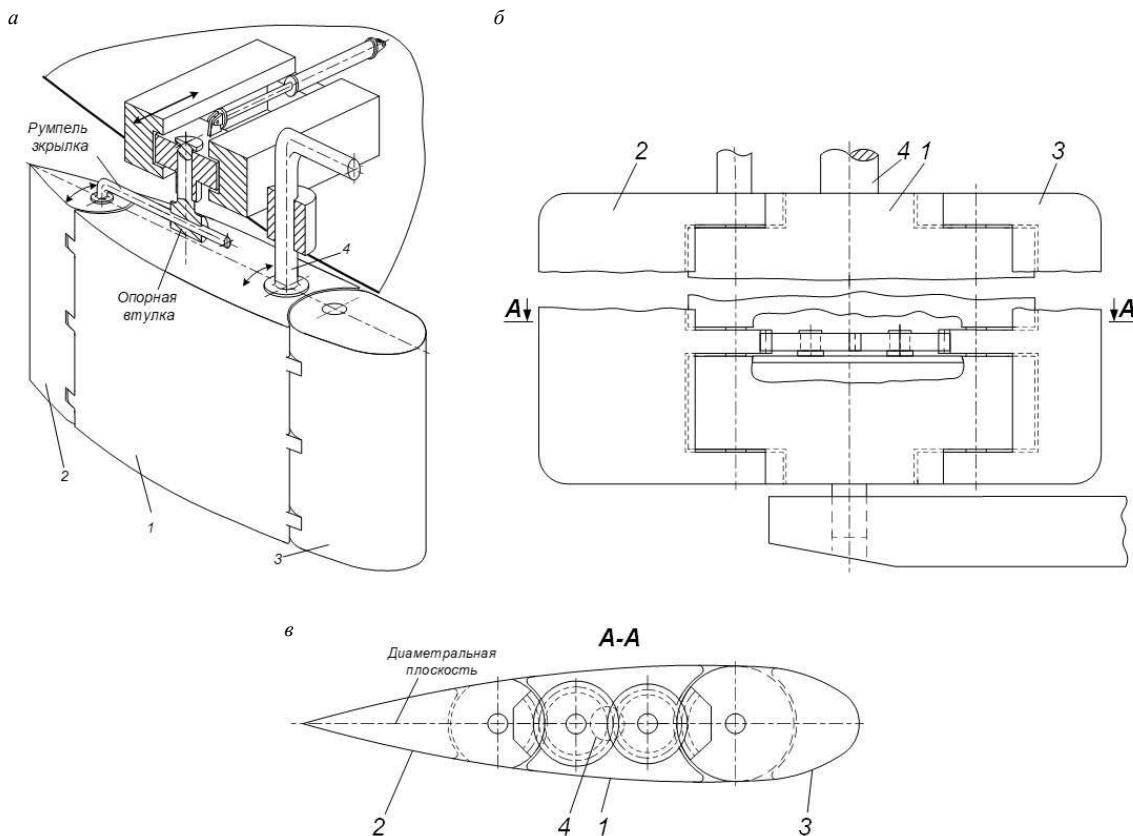


Рис. 5. Общий вид рулевого устройства (а), боковой вид пера руля (б) и сечение А-А, обозначенное на боковом виде (в):
1 — перо руля; 2 — закрылок; 3 — предкрылок; 4 — баллер

Рулевое устройство включает перо руля 1, закрылок 2 и предкрылок 3, сопряженные друг с другом посредством шарниров. Перо руля жестко соединено с баллером 4. Во внутренней полости пера руля на платформе расположены две находящиеся в зацеплении друг с другом шестерни, закрепленные на ней вертикальными осями с возможностью свободного вращения. При этом одна из шестерней находится в зацеплении с зубчатым сектором, сопряженным с петлей закрылка, а другая находится в зацеплении с зубчатым сектором, сопряженным с петлей предкрылка.

На рис. 6а показано горизонтальное сечение руля в повернутом положении для разворота судна вправо при движении передним ходом. При развороте судна влево повернутый руль примет симметричную относительно диаметральной плоскости форму.

При движении задним ходом закрылок и предкрылок при повороте влево по отношению к направлению движения займут положение, показанное на рис. 6б, а при развороте судна вправо руль примет симметричную относительно диаметральной плоскости форму.

Как уже говорилось ранее, ведущей из двух отклоняемых частей руля в данном техническом решении является закрылок, а при его автоматическом отклонении при перекладке руля через зубчатую передачу осуществляется поворот предкрылка. Кинематика механизма очевидна из рис. 6.

Относительная компактность и простота привода в виде зубчатой передачи в сравнении с другими механизмами дает возможность его размещения в ограниченной по размерам внутренней полости основной части пера руля, обеспечивая тем самым защиту механизма от возможных внешних механических воздействий.

Соотношение величин углов поворота предкрылка 3 и закрылка 2 относительно пера руля ϕ_1 и ϕ_2 соответственно зависит от соотношения диаметров делительных окружностей зубчатых секторов 7 и 8 и не зависит от диаметров делительных окружностей промежуточных шестерней.

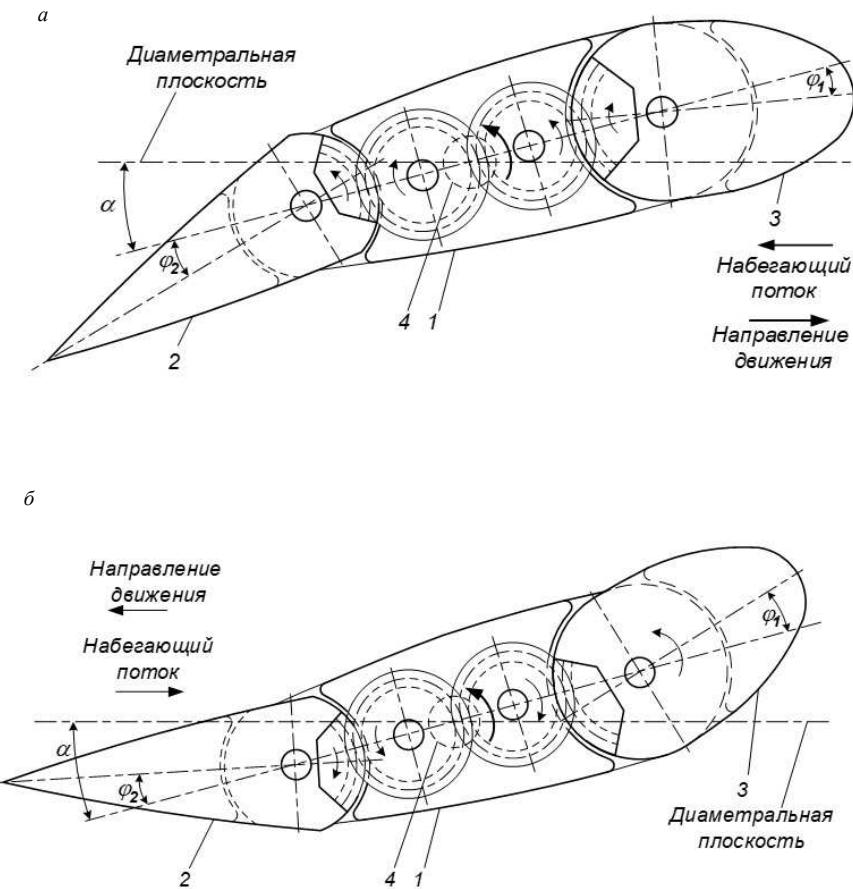


Рис. 6. Форма профиля руля при повороте вправо при движении передним ходом (а); то же при повороте влево по отношению к направлению движении задним ходом (б)

На рис. 7 показаны делительные окружности, четыре зубчатых колеса, находящихся в зацеплении. Под d_1 и d_2 подразумеваются зубчатые секторы, жестко закрепленные на предкрылке и закрылке соответственно, а под величинами φ_1 и φ_2 — углы их поворота.

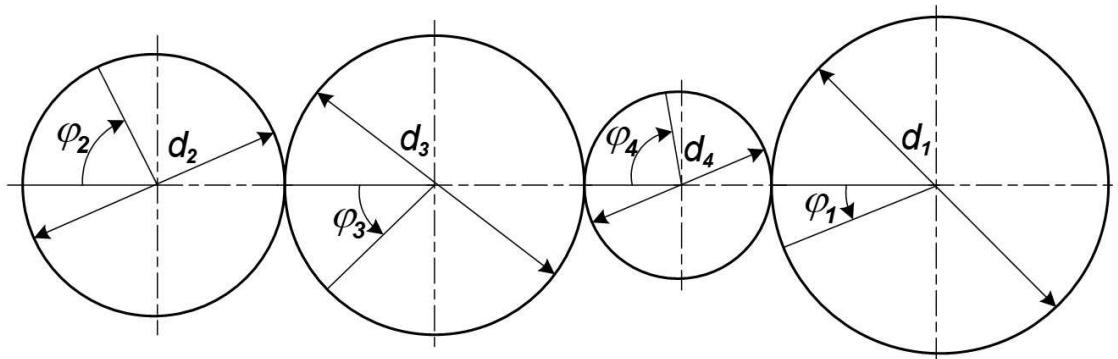


Рис. 7. К определению соотношения углов отклонения предкрылка φ_1 и закрылка φ_2 относительно пера руля

Опуская подробные выкладки, запишем соотношение между углами поворота предкрылка и закрылка:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \frac{d_2}{d_1}. \quad (1)$$

Соотношение диаметров делительных окружностей зубчатых секторов закрылка и предкрылка выбирается в соответствии с (1). Оптимальное для наибольшей эффективности руля соотношение углов φ_1 и φ_2 при движении как передним, так и задним ходом должно быть определено на основе гидродинамического исследования. Диаметры промежуточных шестерней, которые не имеют определяющего значения, следует находить конструктивно.

ПЕРО РУЛЯ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ ПОВОРОТА ПРЕДКРЫЛКА

В данном рулевом устройстве поворот закрылка в зависимости от перекладки основной части руля осуществляется так же, как в рассмотренном выше устройстве (рис. 5а). При этом поворот предкрылка в зависимости от поворота закрылка осуществляется посредством гидравлического привода.

Гидравлический привод более компактен по сравнению с рычажным механизмом, как в статическом состоянии в положении «руль прямо», так и при максимальном отклонении предкрылка и закрылка. Амплитуда отклонения подвижных элементов гидравлического привода во всем рабочем диапазоне обеспечивает их движение в пределах габаритов внутренней полости пера руля, где размещен этот привод.

На рис. 8 показано горизонтальное сечение пера руля, в месте расположения в его полости гидравлической системы, которая обеспечивает синхронное отклонение предкрылка 3 при отклонении закрылка 2.

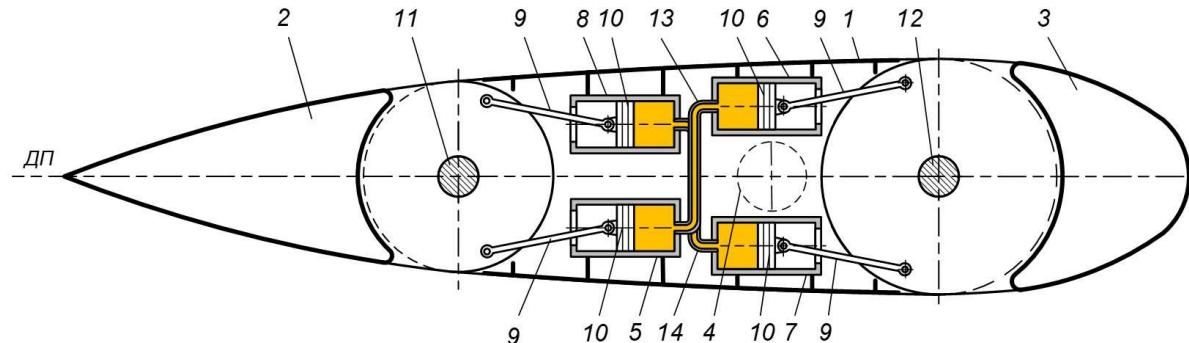


Рис. 8. Руль с гидравлическим приводом поворота предкрылка: 1 — перо руля; 2 — закрылок; 3 — предкрылок; 4 — баллер; 5 — 8 — гидравлические цилиндры; 9 — шатуны; 10 — поршни; 11, 12 — оси вращения закрылка и предкрылка соответственно; 13, 14 — трубопроводы цилиндров 5 — 6 и 7 — 8 соответственно

Гидравлическая система, размещенная в полости основной части руля, состоит из двух пар соединенных друг с другом по диагонали цилиндров (5 и 6; 7 и 8). При необходимости, обусловленной ограниченными размерами внутренней полости пера руля, пары цилиндров могут быть разнесены по высоте внутренней полости пера руля. В каждой паре цилиндры, соединенные друг с другом трубопроводом, образуют замкнутую систему. При повороте закрылка гидравлическая жидкость из сопряженного с ним цилиндра нагнетается в соединенный с ним трубопроводом цилиндр, сопряженный с предкрылком, и обеспечивает его поворот.

На рис. 9а показано то же горизонтальное сечение пера руля в повернутом положении при развороте судна вправо. При развороте судна влево повернутое перо руля примет симметричную относительно диаметральной плоскости форму.

При движении задним ходом закрылок и предкрылок при повороте влево по отношению к направлению движения займут положение, показанное на рис. 9б, а при развороте судна вправо перо руля примет симметричную относительно диаметральной плоскости форму.

Устройство работает следующим образом (на примере поворота вправо на переднем ходу). При повороте пера руля относительно диаметральной плоскости судна (рис. 9а) происходит автоматический поворот закрылка относительной пера руля в ту же сторону, что и поворот пера руля на угол φ_2 . При этом шатун 9 давит на поршень 10 цилиндра 5, поршень вдвигается в цилиндр, создавая избыточное давление в нем и в соединенном с ним трубопроводом 13 цилиндре 6. Под действием этого давления поршень 10 и сопряженный с ним шатун 9 цилиндра 6 выдвигаются из цилиндра, создавая усилие, которое передается шатуном на петлю шарнира предкрылка и поворачивает его в сторону, противоположную повороту пера руля, на угол φ_1 . При этом в другой паре цилиндров происходит обратный переток жидкости.

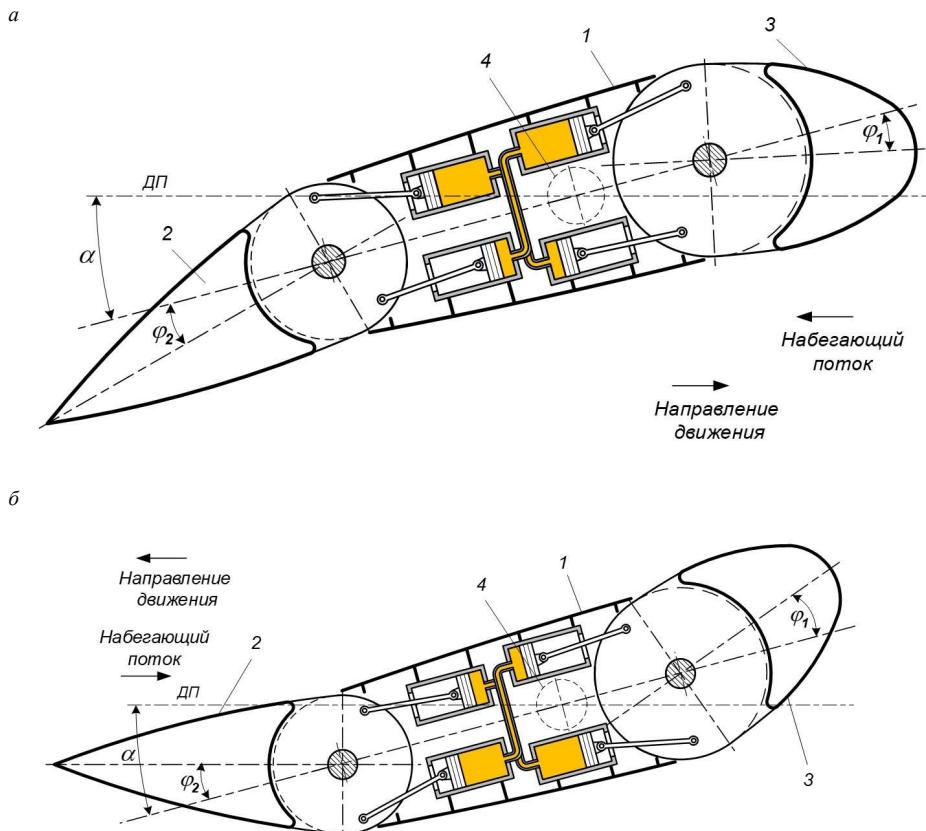


Рис. 9. Положение элементов составного руля с гидравлическим приводом поворота предкрылька:
 а — поворот вправо на переднем ходу; б — поворот влево на заднем ходу; α — угол атаки;
 φ_1 — угол отклонения предкрылька; φ_2 — угол отклонения закрылка

Принцип действия устройства продемонстрирован на примере поворота судна вправо при движении передним ходом. При повороте судна влево имеет место силовая и геометрическая симметрия относительно ДП по отношению к описанной выше.

Рис. 9б иллюстрирует работу гидравлического привода при движении задним ходом.

Величина углов поворота закрылка 2 и предкрылька 3 относительно основной части руля φ_2 и φ_1 соответственно зависят от двух параметров:

- от диаметра поршней цилиндров 5 и 8, а именно d_2 , по отношению к диаметру поршней цилиндров 6 и 7, а именно d_1 ;
- от величины радиуса крепления шатунов цилиндров 5 и 8 на петле шарнира закрылка, а именно r_2 , по отношению к радиусам крепления шатунов цилиндров 6 и 7 на петле шарнира предкрылька, а именно r_1 .

Выбор этих конструктивных параметров на основе соответствующих исследований должен обеспечивать оптимальное для наибольшей эффективности руля соотношение углов φ_1 и φ_2 .

На рис. 10 представлена кинематическая схема взаимодействия одного из гидравлических цилиндров и сопряженных с ним кинематических пар привода поворота закрылка. Аналогичная схема применима для управления предкрыльком.

При повороте закрылка на угол φ_2 ход поршня равен l_2 . При этом шатун АВ займет положение А'В'. а объем рабочей полости уменьшится на величину объема ΔV_2 перетекшей в сопряженный цилиндр предкрылька гидравлической жидкости. Этот объем определяется выражением

$$\Delta V_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} l_2. \quad (2)$$

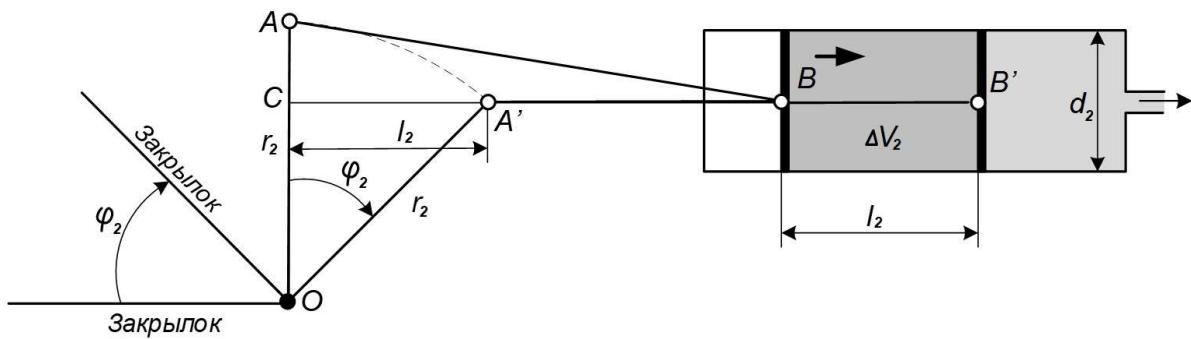


Рис. 10. Кинематическая схема взаимодействия одного из гидравлических цилиндров и сопряженных с ним кинематических пар привода поворота закрылка

При этом объем рабочей полости сопряженного цилиндра предкрылка увеличится на величину

$$\Delta V_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} l_1. \quad (3)$$

Из треугольника ОСА' следует

$$l_2 = CA' = r_2 \sin \varphi_2, \quad (4)$$

и аналогично для предкрылка

$$l_1 = r_1 \sin \varphi_1. \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в (2) и (3) соответственно, запишем

$$\Delta V_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} r_2 \sin \varphi_2; \quad (6)$$

$$\Delta V_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} r_1 \sin \varphi_1; \quad (7)$$

Очевидно, что в замкнутой системе цилиндров $\Delta V_1 = \Delta V_2$, то есть

$$\frac{\pi d_1^2}{4} r_1 \sin \varphi_1 = \frac{\pi d_2^2}{4} r_2 \sin \varphi_2,$$

или после сокращения

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{d_2^2 r_2}{d_1^2 r_1}. \quad (8)$$

Как было сказано выше, оптимальное соотношение углов φ_1 и φ_2 должно быть определено по результатам гидродинамических исследований. С использованием зависимости (8) при заданных φ_1 и φ_2 возможны несколько вариантов проектирования элементов устройства.

1. Если используются одинаковые цилиндры, то есть $d_1 = d_2$, то

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{r_2}{r_1}, \quad (9)$$

и радиусы r_1 и r_2 подбираются конструктивно при сохранении пропорции (9).

2. Если радиусы r_1 и r_2 выбраны по конструктивным соображениям, например в связи с ограничениями, налагаемыми размерами профиля, то диаметры цилиндров определяются из соотношения

$$\frac{d_2}{d_1} = \sqrt{\frac{r_1 \sin \varphi_1}{r_2 \sin \varphi_2}}. \quad (10)$$

3. Возможен вариант подбора обоих диаметров и обоих радиусов с использованием зависимости (8).

Преимуществом рассмотренного технического решения является относительная компактность гидравлического привода в статическом состоянии и при работе в сравнении с рычажной конструкцией привода, что дает возможность его размещения в ограниченной по размерам полости пера руля.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО УГЛА АТАКИ РУЛЯ И ЕГО ПОВОРОТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Комплекс отклоняемых частей авиационного крыла принято называть общим термином «механизация крыла». По аналогии уместен термин «механизация руля».

Рис. 11 иллюстрирует эффективность элементов механизации крыла для увеличения подъемной силы, характеризуемой коэффициентом подъемной силы C_y и критического угла атаки α_{kp} , соответствующего максимуму C_y и началу его резкого падения. Видно, что с этой точки зрения наиболее эффективно крыло, снабженное предкрылком и закрылком.

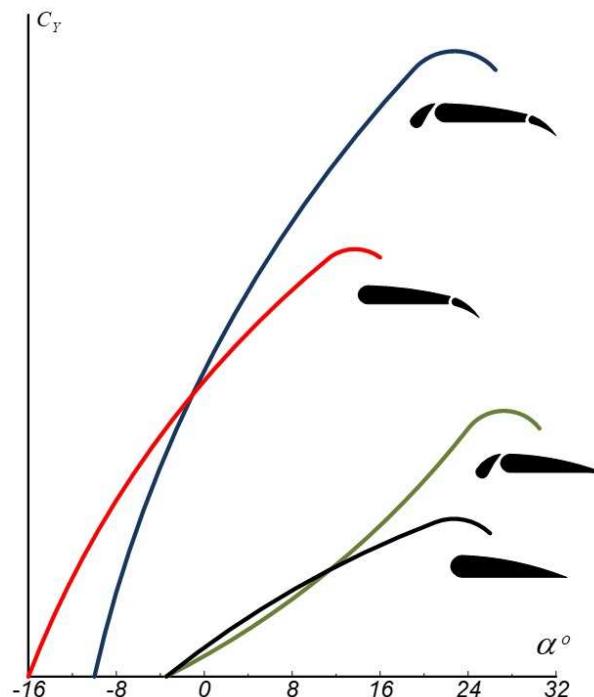


Рис. 11. Эффективность элементов механизации крыла

Для каждого профиля крыла существует критический угол атаки α_{kp} , при превышении которого на верхней поверхности крыла происходит отрыв потока, сопровождающийся резким снижением подъемной силы.

Увеличить подъемную силу (C_y) можно посредством изменения профиля крыла, для чего используется механизация крыла. Отклонение предкрылка и закрылка (рис. 11) и (рис. 12; [13]) меняет кривизну профиля крыла, увеличивая тем самым подъемную силу.

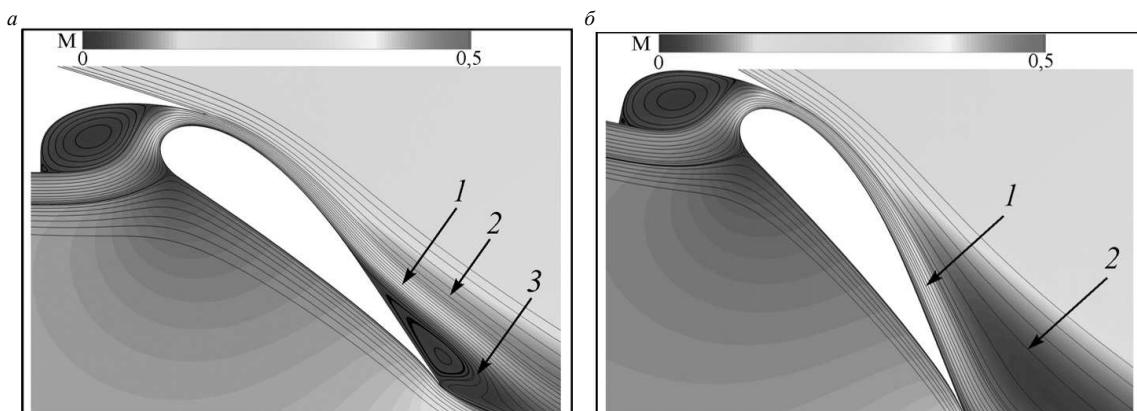


Рис. 12. Картина обтекания хвостовой части крыла при отклонении закрылка на углы $\alpha = 8^\circ$ (а) и $\alpha = 20^\circ$ (б) соответственно: 1 — поток из щели закрылка; 2 — след от основного профиля; 3 — область отрыва [13]

На рис. 12 слева направо показана картина обтекания хвостовой части крыла при отклонении закрылка на углы $\alpha = 8^\circ$ и $\alpha = 20^\circ$ соответственно [13].

Видно также, что закрылок не только поворачивается на некоторый угол, но еще и отодвигается от кромки крыла, образуя щель. Такие закрылки называются щелевыми.

Поворот закрылка создает излом гладких поверхностей крыла. Результатом этого является отрыв потока, начиная от места излома, со всеми вытекающими последствиями. Наличие щели меняет картину обтекания. Щель представляет собой сужающийся кверху канал. Повышенное с нижней вогнутой стороны крыла давление направляет воздух в щель. При движении в сужающейся щели увеличивается скорость потока. Выходя на верхнюю поверхность, поток обеспечивает безотрывное обтекание закрылка.

Аналогичные эффекты возникают в месте установки предкрылка, который также отклоняется с образованием щели.

На судовых рулях переменного профиля возникают те же явления: отрыв потока сопровождается снижением C_y , то есть управляемости.

Закрылки и предкрылки судовых рулей вращаются вокруг шарниров, то есть выдвижение с образованием щели не предусмотрено, а простой перенос механизма привода движения элементов механизации самолетного крыла на судовой руль невозможен из-за его относительной сложности и «хрупкости». Неизбежны повреждения при столкновении с плавающими предметами и особенно со льдом.

Для обеспечения безотрывного обтекания руля переменного профиля в рабочем диапазоне углов перекладки, в том числе при угле перекладки, соответствующем его наивысшей эффективности, разработана представленная ниже конструкция руля изменяемого профиля.

На рис. 13 показан общий вид руля в трех проекциях: боковой вид, вид с носа и вид сверху, а на рис. 14 — положение элементов механизации при движении прямо (б), при повороте влево (а) и повороте вправо (в).

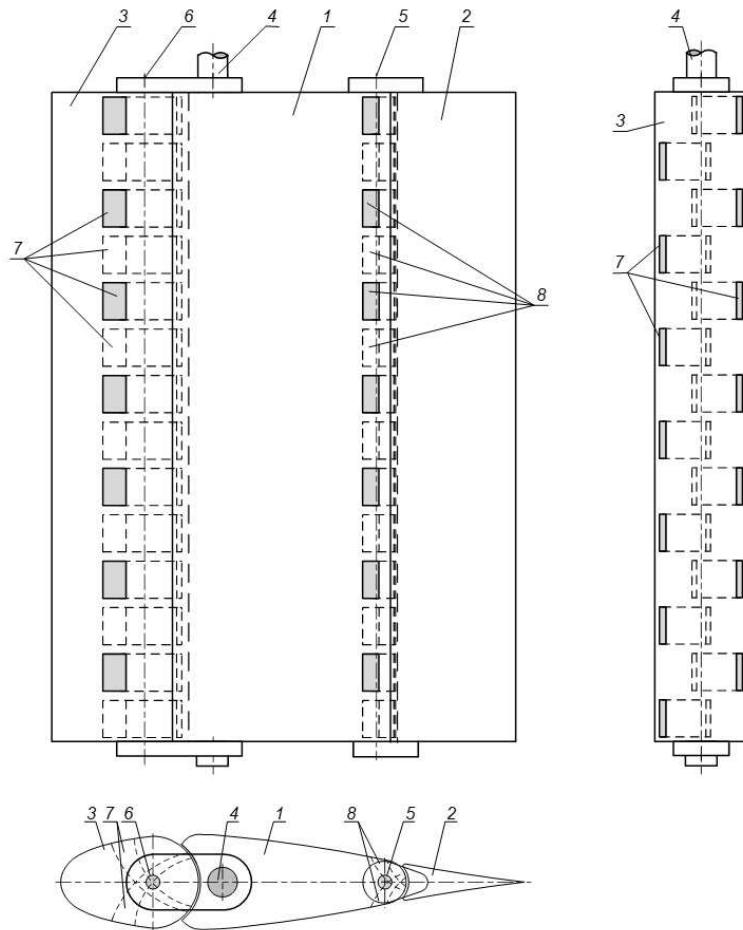


Рис. 13. Общий вид руля в трех проекциях: боковой вид, вид с носа и вид сверху:

1 — перо руля; 2 — закрылок; 3 — предкрылок; 4 — баллер; 5 — ось вращения закрылка; 6 — ось вращения предкрылка; 7 — сквозной сужающийся канал в предкрылке; 8 — сквозной сужающийся канал в хвостовой части пера руля

Криволинейными стрелками на рис. 14 показано направление потоков воды, обтекающих руль.

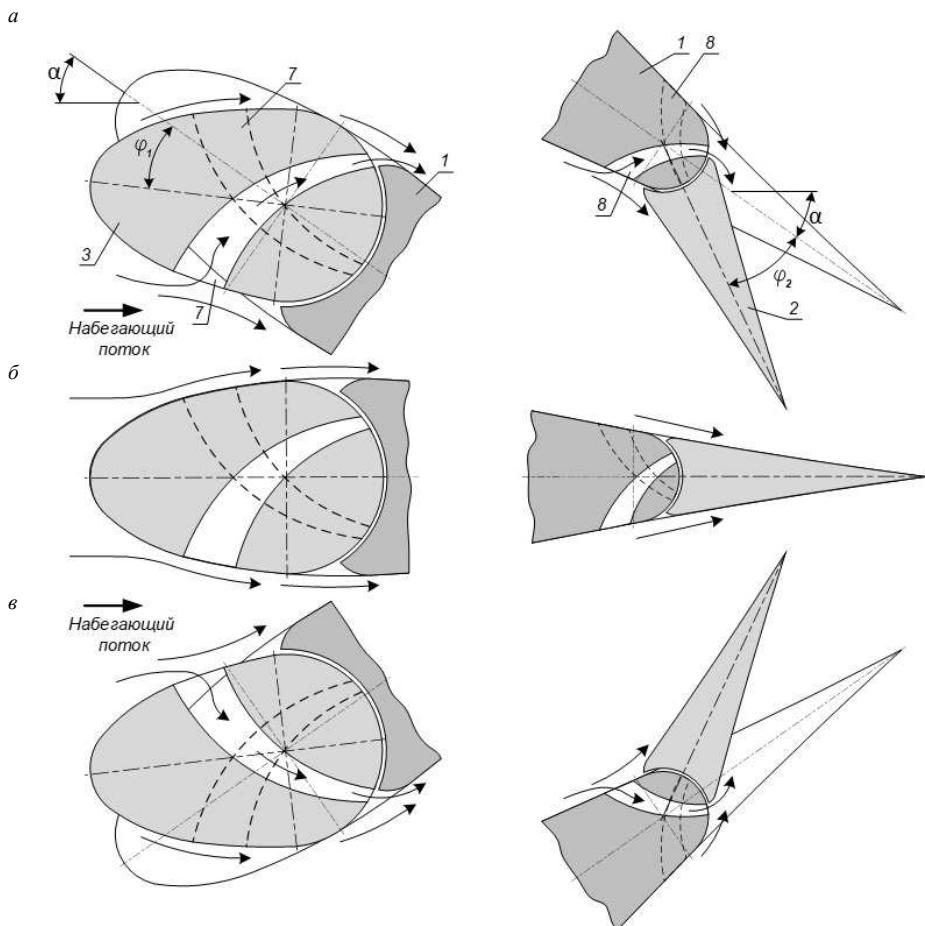


Рис. 14. Положение элементов механизации при движении прямо (б), при повороте влево (а) и повороте вправо (в):
 1 — перо руля; 2 — закрылок; 3 — предкрылок; 7 — сквозной сужающийся канал в предкрыльке;
 8 — сквозной сужающийся канал в хвостовой части пера руля

Для создания эффекта щели в предкрыльке выполнены равномерно распределенные по его высоте сквозные каналы сужающиеся сечения 7. Входы в суживающиеся каналы выполнены с обеих сторон предкрылька, а выходы из них находятся на цилиндрической поверхности, по которой при повороте предкрылька сопряжены его кормовая часть и носовая кромка основной части пера руля. Аналогичные суживающиеся сквозные каналы 8 выполнены в кормовой кромке основной части пера руля. Входы в суживающиеся каналы выполнены с обеих сторон пера руля, а выходы из них находятся на цилиндрической поверхности, по которой при повороте закрылка сопряжены его носовая часть и кормовая кромка основной части пера руля. Каналы по высоте по отношению друг к другу расположены в «шахматном» порядке, что обеспечивает работу руля при перекладке на оба борта.

Устройство работает следующим образом. При прямолинейном движении судна перо руля, закрылок и предкрылок представляют собой единое целое в виде обтекаемого профиля, симметричного относительно диаметральной плоскости (рис. 13, 14б). При этом каналы закрыты.

Для обеспечения поворота судна происходит поворот пера на угол атаки α в сторону одного из бортов (рис. 13а, в). Одновременно происходит поворот закрылка и предкрылька на углы φ_2 и φ_1 соответственно. При угле атаки, близком к критическому акр, предкрылок и закрылок поворачиваются настолько, что открывают выходы из суживающихся каналов (рис. 14а, в).

При этом потоки воды с вогнутой стороны руля с повышенным давлением перетекают по каналам на выпуклую сторону руля с пониженным давлением. При движении воды по суживающемуся каналу возрастает скорость потока, и после выхода из канала ускоренный поток предотвращает отрыв потока, повышая тем самым C_y , то есть подъемную силу, и увеличивая критический угол атаки α_{kp} , улучшая, таким образом, управляемость судна.

Предлагаемым устройством могут быть снабжены рули с любой конфигурацией их механизации (только предкрылок, только закрылок или предкрылок и закрылок одновременно) и при любых известных принципах действия приводов поворота предкрылка и закрылка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные технические решения устраниют ряд недостатков, свойственных известным конструкциям рулей изменяемого профиля, а также улучшают их гидродинамические характеристики, повышая тем самым эффективность рулей и, следовательно, улучшая управляемость судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по теории корабля: в 3 т. Т. 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / под ред. Я.И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — 540 с.
2. Атлас гидродинамических характеристик судовых рулей // Труды НИИВТ. — 1972. — Вып. 72. — 87 с.
3. Сутуло С.В. О нормировании маневренных качеств морских судов / С.В. Сутуло // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 1996. — Вып. 19. — С. 109 — 121.
4. Шмырев А.Н. Успокоители качки судов / А.Н. Шмырев, В.А. Мореншильд, С.Г. Ильина. — Л.: Судпромгиз, 1961. — 516 с.
5. Чекризов Г.В. Справочник по успокоителям качки с бортовыми рулями / Г.В. Чекризов, М.С. Темкин, В.О. Воробьев. — Л.: Судостроение, 1979. — 255 с.
6. Патент на изобретение № 2551948. Судовое рулевое устройство: заявл. 08.04.2014: опубл. 10.06.2015, БИ № 16 / Аносов А.П.; заявитель ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)».
7. Патент на изобретение № 2592706. Судовое рулевое устройство: заявл. 09.07.2015, опубл. 27.07.2016, БИ № 21 / Аносов А.П., Шаринкова О.С., Герман А.П.; заявитель ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)».
8. Патент на полезную модель № 153733. Судовое рулевое устройство: заявл. 22.01.2015, опубл. 27.07.2015, БИ № 21 / Аносов А.П., Шаринкова О.С., Герман А.П.; заявитель ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)».
9. Патент на изобретение № 2721804. Судовое рулевое устройство: заявл. 13.11.2019, опубл. 22.05.2020, БИ № 15 / Аносов А.П., Восковщук А.П., Козырев Д.В.; заявитель ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)».
10. Аносов А.П. Рулевые устройства с пером руля изменяемого профиля / А.П. Аносов, А.П. Герман, О.С. Шаринкова // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2015. — Вып. 89.2 (273.2). — С. 197 — 202.
11. Шаринкова О.С. Противоледовая конструктивная защита винторулевого комплекса судов ледового плавания: дисс. ... канд. техн. наук / О.С. Шаринкова; ДВФУ. — Владивосток, 2022. — 23 с.
12. Шаринкова О.С. Сравнительная оценка гидродинамических характеристик руля изменяемого профиля в составе винторулевого комплекса судна ледового класса / О.С. Шаринкова, А.П. Аносов, И.А. Новосельцев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2022. — № 66/67. — С. 49 — 57. — EDN GELNOD.
13. Румянцев А.Г. Расчетно-экспериментальное исследование обтекания механизированных профилей / А.Г. Румянцев, В.А. Сильтантьев // Теплофизика и аэромеханика. — 2010. — Т. 17, № 3. — С. 291 — 306.

REFERENCES

1. Spravochnik po teorii korablya: v 3 t. / pod red. Ya.I. Voitkunskogo [Handbook in ship theory: in 3 vols. Vol. 3: Controllability of displacement vessels. Hydrodynamics of vessels with dynamic principles of maintenance / Ya.I. Voitkunskii (ed.)]. Leningrad: Sudostroenie, 1985. 540 p.
2. Atlas gidrodinamicheskikh kharakteristik sudovykh rulei [Atlas of hydrodynamic characteristics of ship rudders]. Trudy NIIVT [Transactions of the Novosibirsk Institute of Water Transport Engineers]. 1972. Issue 72. 87 p.
3. Sutuло S.V. O normirovaniи maneuvrennykh kachestv morskikh sudov [On the normalization of maneuverability qualities of marine vessels]. Nauchno-tehnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping]. 1996. Issue 19. P. 109 — 121.
4. Shchmyrev A.N., Morenshild V.A., Ilyina S.G. Uspokoiteli kachki sudov [Calming agents for pitching ships]. Leningrad: Sudpromgiz, 1961. 516 p.
5. Chekriзов G.V., Temkin M.S., Vorobyev V.O. Spravochnik po uspokoitelyam kachki s bortovymi rulyami [Handbook of pitching dampers with side rudders]. Leningrad: Sudostroenie, 1979. 255 p.
6. Shipboard steering gear: Patent for invention No. 2551948, dated 08.04.2014, publ. on 10.06.2015, bul. No. 16 / Anosov A.P.; applicant Far Eastern Federal University.
7. Shipboard steering device: Patent for invention No. 2592706, dated 09.07.2015, publ. on 27.07.2016, bul. No. 21 / Anosov A.P., Sharinkova O.S., German A.P.; applicant Far Eastern Federal University.
8. Ship steering device: Utility Model Patent No. 153733, dated 22.01.2015, publ. on 27.07.2015, bul. No. 21. / Anosov A.P., Sharinkova O.S., German A.P.; applicant Far Eastern Federal University.

9. Ship steering device: Patent for invention No. 2721804, dated 13.11.2019, publ. on 22.05.2020, bul. No. 15 / Anosov A.P., Voskovchuk A.P., Kozyrev D.V; applicant Far Eastern Federal University.
10. Anosov A.P., German A.P., Sharinkova O.S. Steering devices with a variable-profile rudder. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2015. Issue 89.2 (273.2). P. 197 — 202. (In Russ.)
11. Sharinkova O.S. Protivoledovaya konstruktivnaya zashchita vintorulevogo kompleksa sudov ledovogo plavaniya [Anti-ice structural protection of the rotary steering complex of ice navigation vessels: PhD thesis] / Far East Federal Univ. Vladivostok, 2022. 23 p.
12. Sharinkova O.S., Anosov A.P., Novoseltsev I.A. Comparative evaluation of hydrodynamic characteristics of variable profile rudder as a part of ice class ship propulsion complex. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. No. 66/67. 2022. P. 49 — 57. EDN GELNOD. (In Russ.)
13. Rumyantsev A.G., Silantyev V.A. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie obtekaniya mekhanizirovannykh profilei [Computational and experimental study of the flow of mechanized profiles]. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2010. Vol. 17, No. 3. P. 291 — 306.