



Автоматизированный активный траловый комплекс

DOI

Кандидат технических наук
В.А. Пелешенко – доцент
 Департамента анализа данных
 и машинного обучения
 Финансового университета
 при Правительстве Российской
 Федерации

@ vitaliy.peleshenko@yandex.ru

Ключевые слова:
 автоматизированный
 активный траловый
 комплекс,
 гидродинамические
 особенности, внутренняя
 и внешняя компоновка,
 пропульсивные установки,
 система управления

Keywords:
 automated active trawl
 complex, hydrodynamic
 features, internal and
 external layout, propulsive
 installations, control system

AUTOMATED TRAWL COMPLEX MANAGEMENT SYSTEM

Candidate of Technical Sciences **V.A. Peleshenko** – Associate Professor of the Department of Data Analysis and Machine Learning of the Financial University under the Government of the Russian Federation

The article is devoted to the problems of developing an automated active trawl complex. The main structural features of the developed automated active trawl complex are described, including its hydrodynamic features, internal and external layout, polar installations and control system.

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей статье [1] была представлена система механизации траловых распорных досок. Следующим эволюционным этапом развития траловых систем является создание активных средств раскрытия, обладающих собственным движителем, независимым от ваерной системы судна. Дело в том, что при тралении судно затрачивает энергию на преодоление сопротивления трения корпуса, сопротивление формы и волнового сопротивления. Объёмы, занимаемые корпусом траулера, обусловлены размещением экипажа, объемом оборудования для рыбопереработки и сопутствующих корабельных устройств, собственно, не используемых при тралении [1]. Объем энер-

гетической установки, продуцирующей энергию для обеспечения траления, составляет 1/10 от общих объёмов корпуса судна. Для обеспечения буксировки траловой стометровой системы с усилием $9 \cdot 10^4$ Н дополнительно судно потребляет усилие $7 \cdot 10^4$ Н на преодоление собственного гидродинамического сопротивления. Ряд сопротивлений, таких как волновое, обусловлено спецификой движения на границе раздела сред, составляет треть от $7 \cdot 10^4$ Н и уходит на волнообразование [1]. Поэтому суда с подводным принципом движения обладают большей скоростью и эффективностью. В надводном положении подводные суда имеют почти вдвое меньшую скорость при движении, неже-

ли в подводном положении при той же затраченной мощности. При этом, в случае перехода на активные средства раскрытия, обладающие собственными движителями, почти в 10 раз сокращается площадь смоченной поверхности, а, следовательно, и всех составляющих гидродинамического сопротивления.

Уход от надводного к подводному принципу буксировки обеспечивает экономию 30% мощности или, в пересчёте на проектную стометровую траловую систему, $2,1 \cdot 10^4$ Н тягового усилия. Сокращение ненужных объёмов и механизмов при буксировке способно сократить оставшееся необходимое добавочное усилие в $4 \cdot 10^4$ Н до $0,5 \cdot 10^4$ Н что, по сути, эквивалентно с усилиями, возникающими на траловых досках. Таким образом, целесообразно отказаться от буксировки трала траулером и установить движительный комплекс на траловые доски. Это приведёт к сокращению общего буксировочного усилия с $16 \cdot 10^4$ Н до $9,5 \cdot 10^4$ Н и сократит тем самым сопутствующие топливные расходы на 40%, что приведёт к увеличению рентабельности промысла. С этой целью была разработана и испытана система активных средств раскрытия.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для достижения основных проектных характеристик рассмотрим диапазон величин распорной силы при применении активных траловых устройств в составе разноглубинных траловых комплексов.

Для этого сравним активную систему с обычным траловым комплексом. Схематизируем её структуру по методике, предложенной Ф.И. Барановым [2; 3]. В классическом виде, при использовании траулера в качестве источника буксировочной силы и пассивных траловых досок, система имеет вид как изображено на рисунке 1.

На рисунке 1 точкой А обозначено положение траулера, отрезки АВ и АВ₁ – ваеры, точки В и В₁ – траловые доски, отрезки ВС и В₁С₁ – кабели, отрезок СС₁ – устье трала, треугольник CDC₁ – канатно-сетная часть трала.

Сила буксировки, создаваемая траулером, симметрично распределяется по ваерам. Дан-

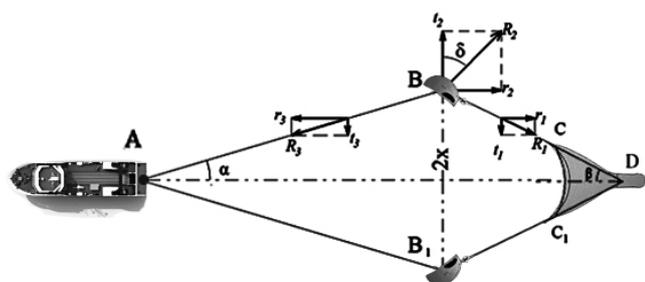


Рисунок 1. Схематизация траловой системы (по Ф.И. Баранову)
Figure 1. Schematization of the trawl system (according to F.I. Baranov)

Статья посвящена проблемам разработки автоматизированного активного тралового комплекса. Изложены основные конструкционные особенности разработанного автоматизированного активного тралового комплекса включая его гидродинамические особенности, внутреннюю и внешнюю компоновку, пропульсивные установки и систему управления.

ная сила обозначена как R_3 , и имеет две составляющие – продольную r_3 и вертикальную. Вертикальная составляющая t_3 обусловлена двумя факторами. Первый фактор заключается в том, что из-за того, что ваера расположены под углом α к продольной плоскости, так как ширина судна значительно меньше, чем раскрытие трала и расстояния между траловыми досками, усилие буксировки смещается на величину этого угла. Второй фактор состоит в том, что сами ваера имеют значительную массу, и она тем больше, чем глубже происходит траление. Таким образом, за счёт собственной массы ваер образует дополнительное стягивающее усилие. Это усилие обратно направлено силе раскрытия трала и ухудшает тем самым показатели траления.

Траловые доски напротив создают распорную силу t_2 , обеспечивающую раскрытие трала. Тем не менее, помимо распорной силы они также обладают собственным гидродинамическим сопротивлением r_2 . Совокупность этих двух сил образует общую величину гидродинамической силы на траловой доске обозначенную R_2 . Общая гидродинамическая сила направлена перпендикулярно поверхности траловой доски и зависит от её конструктивных особенностей, величины набегающего потока жидкости и её пространственного положения. На траловые доски действует сила натяжения кабелей R_1 , сформированная гидродинамическим сопротивлением трала. При этом она имеет две составляющие: t_1 – стягивающее усилие трала, вертикально направленное к осевой линии AD и r_1 , направленное вдоль осевой линии AD. Статическое равновесие траловой системы при этом будет определено совокупным влиянием всех сил и его можно выразить следующей системой уравнений:

$$r_3 - r_1 - r_2 = 0 \tag{1}$$

$$t_2 - t_1 - t_3 = 0$$

При этом величину необходимой распорной силы, формируемой на траловых досках, можно представить, как:

$$t_2 = t_1 + t_3 \tag{2}$$

Смоделируем распределение силы, согласно описанной схематизации проектируемого тралового комплекса при единичной распорной силе:

На рисунке 2 показано нагружение траловой системы при единичной распорной силе. Так

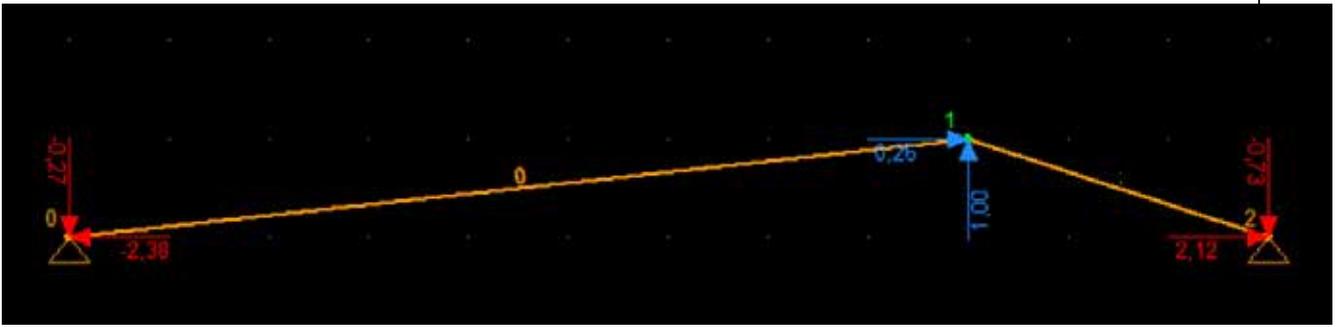


Рисунок 2. Нагружение траловой системы при единичной распорной силе
Figure 2. Loading of the trawl system at a single spacer force

как траловая система симметрична, то рассмотрена только правая часть, при этом в левой части нагрузки будут такие же только с противоположным знаком. Согласно схематизации, на одну единицу распорной силы будет приходиться 0,26 единиц гидродинамического сопротивления при работе траловой доски, величина t_3 будет равна 0,27, а t_1 примет значение 0,73. То есть 26% распорной силы расходуется на преодоление вертикальной реакции ваера t_3 . Избежать этого можно при полном исключении ваеров из рабочей схемы тралового комплекса, за счёт разделения точки буксировки на две составляющие с непосредственным приложением к самим траловым доскам.

БЕЗВАЕРНАЯ ТРАЛОВАЯ СИСТЕМА

В рамках проведённого исследования была разработана безваерная система. Схематизация безваерной траловой системы имеет следующий вид:

При схематизации, изображённой на рисунке 3, исключение расходования 26% распорной силы на преодоление вертикальной реакции ваера позволит пропорционально сократить площадь распорной доски, при сохранении тех же показателей раскрытия трала. Сокращение площади траловой доски, в свою очередь, приведёт к пропорциональному сокращению её гидродинамического лобового сопротивления r_2 . Таким образом, без ущерба для производительности траловой системы, можно разместить в её центральной части пропульсивную установку, как показано на рисунке 4:

На рисунке 4.А изображена обычная траловая доска, 4.Б – траловая доска с пропульсивным комплексом. При установке пропульсивного комплекса на траловую доску, помимо скорости набегающего потока жидкости, на её поверхности образуется дополнительная скорость, вызванная подсосыванием самого винта пропульсивного комплекса и линий тока жидкости вокруг корпуса гондолы пропульсивной установки. Так как распорная сила на траловой доске прямо пропорциональна квадрату скорости потока жидкости, взаимодействующего с её поверхностью, то дополнительное увеличение скорости обтекания, при установке пропульсивного комплекса, повышает её эффектив-

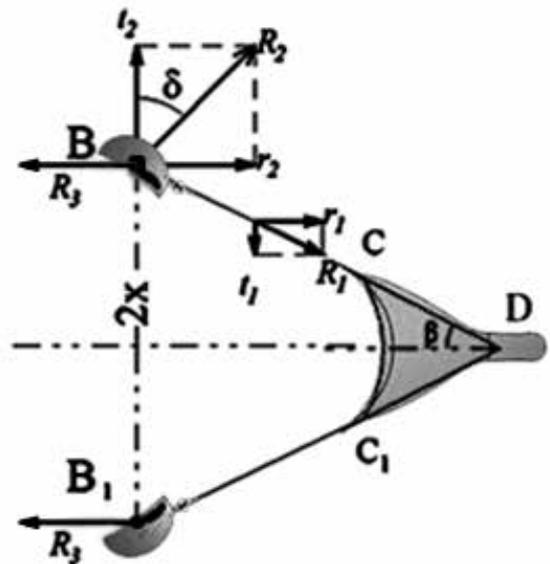


Рисунок 3. Схематизация безваерной траловой системы
Figure 3. Schematization of an unseFRVed trawl system

ность. За счёт этого эффекта удалось сократить площадь траловой доски от первоначальной на 34%, с сохранением неизменной величины распорной силы.

Установка пропульсивного комплекса, помимо вышеизложенных преимуществ, также позволяет, за счёт отклонения в продольно-поперечной плоскости от оси симметрии тралового комплекса во внешнюю сторону, создавать дополнительную распорную силу, за счёт перераспределения буксировочного усилия. Обозначим угол отклонения через γ . Тогда величину дополнительного усилия можно определить по формуле:

$$t_3 = R_3 \sin \gamma \quad (3)$$

Общую величину распорной силы при этом можно определить, как совокупность распорной силы на траловой доске, представляющую собой функцию от угла атаки α с дополнительным отклонением γ и дополнительным приростом от t_3 [4; 5; 6]:

$$t_2 = C_y(\alpha + \gamma) (\rho \cdot v(t)^2 / 2) F + R_3 \sin \gamma \quad (4)$$

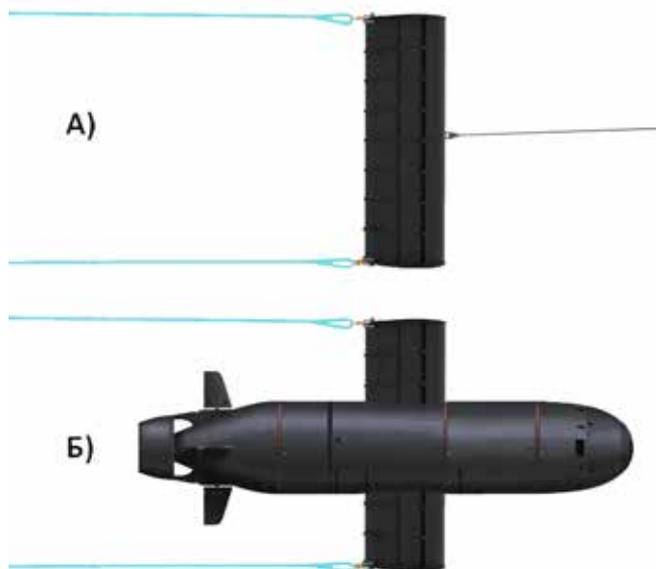


Рисунок 4. Установка пропульсивного комплекса на траловую доску
Figure 4. Installation of a propulsive complex on a trawl board

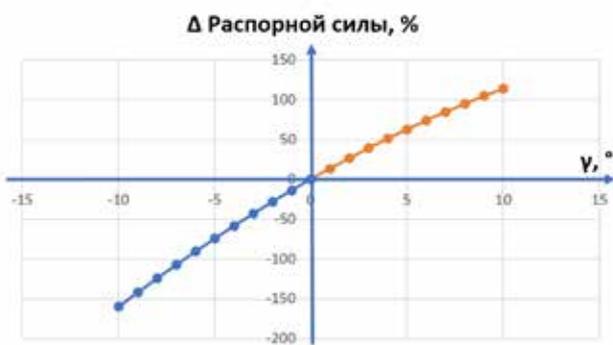


Рисунок 5. Изменение распорной силы от курсового угла
Figure 5. Change in the spacer force from the heading angle



Рисунок 6. Схема активной пропульсивной системы тралового комплекса
Figure 6. Diagram of the active propulsive system of the trawl complex

где R – гидродинамическая сила;
 ρ – плотность жидкости;
 V – скорость траления;
 F – площадь траловой доски;
 α – угол атаки траловой доски;
 γ – отклонение курсового угла хода;
 C_y – коэффициент распорной силы.

При отрицательных значениях γ величина распорной силы, за счёт дополнительной составляющей от буксировочного усилия, наоборот, уменьшается. На рисунке 5 показан график, на котором приведены экспериментальные данные величины изменения распорной силы при различных γ .

Уже при значениях γ равным -4° достигается проектный показатель снижения гидродинамической распорной силы на 50%. При $\gamma = -7^\circ$ снижение распорной силы достигает 100% и дальнейшее снижение γ приводит к отрицательным значениям распорной силы – стягивающему усилию. При γ равном 4° , наоборот, происходит увеличение распорной силы на 50%, и, при дальнейшем увеличении γ до 8° , распорная сила увеличивается на 100% от первоначального значения. Таким образом, γ является эффективным способом управления распорной силой тралового комплекса и позволяет за счёт этого производить смыкание и раскрытие траля, что было доказано в дальнейших испытаниях в рамках макетирования безвального тралового комплекса.

АКТИВНАЯ ТРАЛОВАЯ СИСТЕМА

Активная траловая система базируется на траловых досках, имеющих в своём составе движители. Схема активной траловой доски, входящей в инновационный активный безвальный траловый комплекс, представлена на рисунке 6.

Система активной пропульсивной системы тралового комплекса включает в свой состав три движительных комплекса. Два из них обеспечивают движение в горизонтальной плоскости, а один – вертикальное перемещение. На рисунке 6 правый пропульсивный движительный комплекс представлен электродвигателем – позиция 1, контроллером двигателя – позиция 2, понижающим редуктором – позиция 3, опорноупорным подшипником удерживающим валопровод – позиция 4, герметичной муфтой – позиция 5 и гребным винтом – позиция 6. Левый пропульсивный движительный комплекс представлен электродвигателем – позиция 7, контроллером двигателя – позиция 8, понижающим редуктором – позиция 9, опорноупорным подшипником, удерживающим валопровод – позиция 10, герметичной муфтой – позиция 11 и гребным винтом – позиция 12. Вертикальный пропульсивный движительный комплекс представлен электродвигателем – позиция 13, контроллером двигателя – позиция 14, понижающим редуктором – позиция 15, опорноупорным подшипником – позиция 16, удерживающим валопроводом – позиция 17, герметичной муф-



Рисунок 7.
Электродвигатель
пропульсивного
комплекса
Figure 7. Electric motor
of the propulsive complex

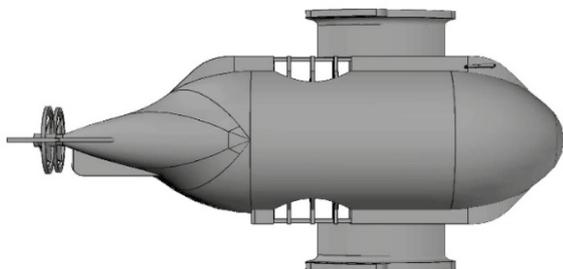


Рисунок 8. Интеллектуальное
инновационное экологическое средство
раскрытия тралового комплекса
Figure 8. Intelligent innovative ecological means of opening
the trawl complex

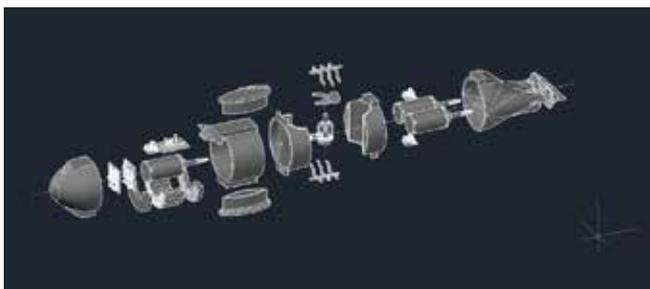


Рисунок 9. Трёхмерная модель активной
автоматизированной системы управления
траловым комплексом
Figure 9. Three-dimensional model of an active automated
trawl complex control system

той – позиция 18, угловым редуктором – позиция 19, двумя подшипниками – позиция 20 и позиция 21, удерживающим вертикальный валом – позиция 22, с муфтой – позиция 23 и гребным винтом – позиция 24.

Было произведено макетирование схемы активной автоматизированной системы управления траловым комплексом. В качестве основы пропульсивных комплексов были взяты электродвигатели мощностью 3700W с классом герметичности IP68, представленные на рисунке 7. Двигатели комплектуются гребным винтом и рассчитаны на производство тягового усилия в 100 кг. Таким образом, общее тяговое усилие двухшаговых пропульсивных комплексов составляет 200 кг, что достаточно для буксировки макета трала, испытанного ранее [1].

Было произведено CAD проектирование ак-

тивной автоматизированной системы управления траловым комплексом, согласно изложенной принципиальной схеме. Разработанная трёхмерная модель активной автоматизированной системы управления траловым комплексом представлена на рисунке 8.

Проработана внутренняя структура и элементы насыщения, как показано на рисунке 9.

Методом трёхмерной печати был изготовлен корпус установки, с последующим насыщением установки электронными компонентами и герметизацией.

Установка подтвердила проектные пропульсивные усилия. На рисунке 10 представлен экспериментальный запуск пропульсивной системы, сделанный в инфракрасной съёмке, позволяющей зафиксировать течение жидкости сквозь винтовой комплекс.

Модельные испытания установки подтвердили полное смыкание трала до 0% раскрытия и полное раскрытие до 100%, при использовании разработанной установки, как показано на кадрах испытаний на рисунке 11. Таким образом, можно управлять тралом, раскрывая его только в момент облова рыбных скоплений и исключая сопутствующий прилов, а также можно сокращать гидродинамическое сопротивление и затраченные энергетические ресурсы при спуске и выборке за счёт смыкания трала.

По результатам проведённых исследований был разработан патент [7], в котором «разноглубинный траловый комплекс отличается тем, что не имеет связки с траулером посредством ваверов, а его движение, включая подъём и спуск, осуществляется за счёт активных траловых досок», представленных позицией 1 на рисунке 12, оборудованных собственными движителями.

УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМ ТРАЛОВЫМ КОМПЛЕКСОМ

На завершающем этапе разработки была создана математическая модель управления активным траловым комплексом, которая ба-



Рисунок 10. Модельные испытания
макета пропульсивной установки модели
интеллектуального инновационного
экологичного тралового комплекса
Figure 10. Model tests of a model of a propulsive
installation of an intelligent innovative
eco-friendly trawl complex

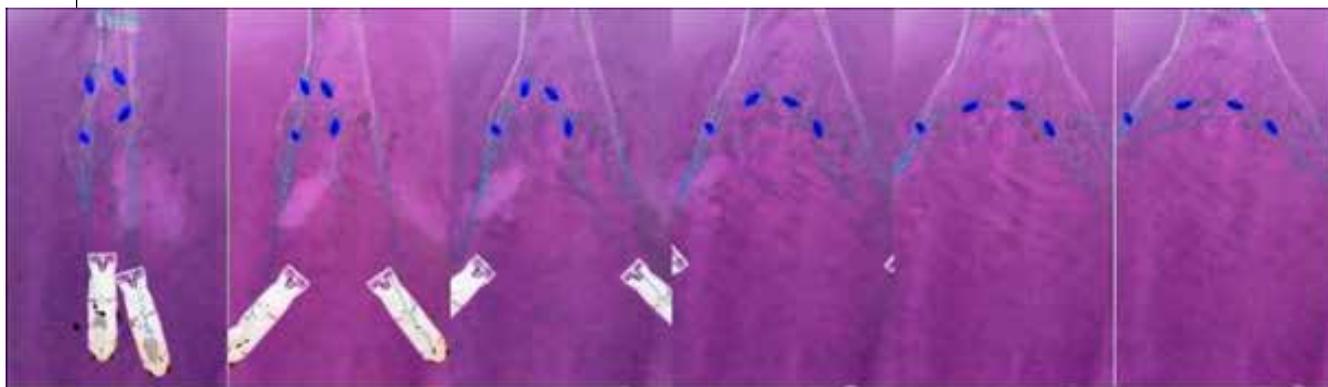


Рисунок 11. Испытание макета установки модели активного тралового комплекса
Figure 11. Testing of the installation layout of the active trawl complex model

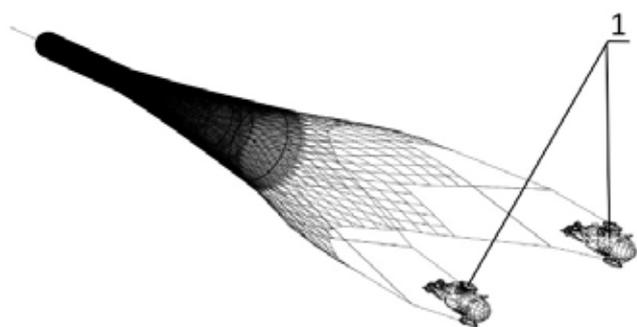


Рисунок 12. Активный траловый комплекс
Figure 12. Active trawl complex

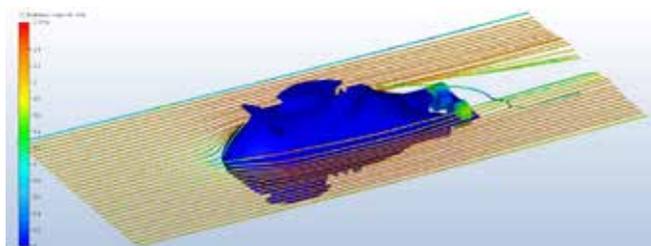


Рисунок 13. Расчётное поле скоростей при движении активных распорных устройств
Figure 13. The calculated velocity field during the movement of active spacers

зируется на адаптивном алгоритме, включающем фильтры Калмана, позволяющем дать точную оценку динамики активных распорных устройств, обладающих собственными импульсивными системами. В качестве исследуемых траекторий движения, помимо прямолинейного, в горизонте объектов лова и движений на всплытии и погружении также рассматриваются движения при маневрировании тралового комплекса, в частности – на режимах циркуляционного движения. Разработан программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий позиционирование траловых комплексов относительно рыбных скоплений и маневрирования, в условиях сложного рельефа местности.

Предлагаемый подход основан на адаптации обычного алгоритма фильтра Калмана с добавлением к нему коэффициента ковариации шумов данных и их корректировки с помощью дополнительных коэффициентов в структуре основного алгоритма. Предложенный алгоритм позволяет дать точную оценку выходных параметров для управления активными траловыми системами, максимально приближенную к реальным эксплуатационным условиям, где входные данные являются мало предсказуемыми, ввиду огромной инвариантности входных параметров. Тем не менее, разработанные математические алгоритмы управления активными подводными траловыми комплексами просты, обладают низким ресурсопотреблением и легко внедряемы в аппаратную часть разработанных активных траловых систем. За счёт этого можно существенно повысить надёжность оценки работы средств автоматизации управления активными траловыми системами, что в суровых условиях промысла является одной из важнейших и актуальных задач промышленного рыболовства.

В проведённой научно-исследовательской работе были рассмотрены различные схемы управления – от системы, на основе пропорционально-интегрально-дифференцирующих регуляторов (ПИД) до адаптивных пространственных инерционных систем, с отслеживанием траектории циркуляции. На основании методов Ляпунова была проанализирована асимптотическая устойчивость для каждой разработанной схемы управления.

Далее было проведено моделирование и численное моделирование на различных режимах работы активных траловых комплексов. Проведённое моделирование включало инвариантность по факторам пространственного позиционирования, мореходным качествам, параметрам электронных датчиков, внешних и внутренних возмущений, внешних течений жидкости и т.д.

Промысловые схемы использования активных траловых систем были детально смоделированы. Полученные результаты пока-

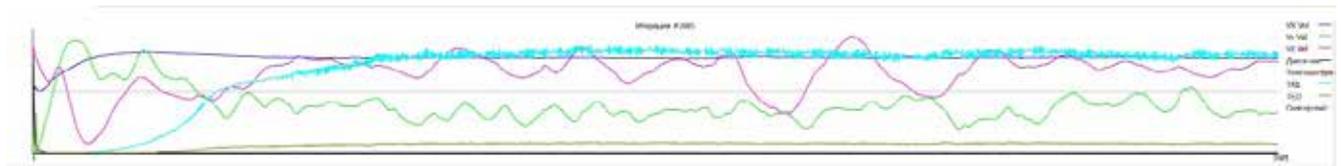


Рисунок 14. Расчётная функция при 3985 итерациях
Figure 14. Calculation function at 3985 iterations

зывают эффективность и надежность разработанной схемы управления, её превосходство над всеми, разработанными на текущий момент, системами в сегменте управления низкоинерционной подводной морской техники.

При проектировании автоматизированных систем управления активных траловых систем важное значение имеет трёхмерное позиционирование активных траловых комплексов, относительно рыбных скоплений, и маневрирование, относительно рельефа морского дна, а также – на водной поверхности относительно траулера при выборке.

В большинстве исследований форма рыбных скоплений, форма рельефа местности и т.д. берётся априорно, а сам траулер, как правило, вообще заменяют материальной точкой. Такой подход мешает создать полноценные автономные системы управления для активных траловых систем и требует участия человека, как на уровне ручного предварительного задания большого объема входных данных, так и для обеспечения непрерывного контроля активных траловых систем. При разработке модели использовалась трёхмерная система позиционирования, обладающая высокой степенью автоматизации и автономности, базирующаяся на датчиках и гидролокаторах, позволяющих системе самостоятельно выстраивать информационное трехмерное поле вокруг себя. В соответствии с этим, были разработаны модели управления, где рассматриваются все основные сценарии эксплуатации активных подводных траловых систем. Разработанные модели управления учитывают гидродинамические особенности траловых комплексов и активных систем раскрытия с интегрированными пропульсивными установками, включая динамические характеристики при маневрировании, скоростные характеристики, характеристики буксировочных усилий и т.д. Эффективность разработанных моделей оценивалась как в рамках кинематического моделирования в среде MATLAB, так и при помощи методов вычислительной гидродинамики в программных комплексах CFD.

Примеры моделирования представлены на рисунке 13, где отображено поле скоростей при движении активных распорных устройств, и на рисунке 14, где отображена соответствующая, ранее представленному движению, расчётная функция при 3985 итерациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведённой научно-исследовательской работы была успешно разработана модель прототипа интеллектуального инновационного активного тралового комплекса. Проведенные испытания прототипа интеллектуального инновационного активного трала методом вычислительной гидродинамики на основе трёхмерной модели траловой системы и испытанные макеты блоков управления и пропульсивных установок подтвердили работоспособность заявленных технических решений. Внедрение разработанного инновационного активного трала способно сократить текущие эксплуатационные расходы и увеличить уловистость, при этом снизив долю прилова и экологического ущерба. Это позволит вывести рыбопромысловый флот на новый уровень технического развития.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ:

1. Пелешенко В.А. Автоматизированная система управления траловым комплексом // Рыбное хозяйство. – 2022. – № 3. – С. 79-89.
1. Peleshenko V.A. Automated trawl complex management system // Fisheries. – 2022. – No. 3. – Pp. 79-89.
2. Баранов Ф.И. Моделирование рыболовных орудий. // Рыбное хозяйство. – 1940. – №5. – С. 20-24.
2. Baranov F.I. Modeling of fishing implements. // Fisheries. – 1940. – No. 5. – Pp. 20-24.
3. Баранов Ф.И. Техника промышленного рыболовства / Ф.И. Баранов. – М.: Пищепромиздат, 1960. – 695 с.
3. Baranov F. And the technique of industrial fishing / F.I. Baranov. – М.: Pishchepromizdat, 1960. – 695 p.
4. Баранов Ф.И. Вертикальное раскрытие трала / Ф.И. Баранов // Рыбное хозяйство. – 1947. – №2. – С. 25-28.
4. Baranov F.I. Vertical opening of the trawl / F.I. Baranov // Fisheries. – 1947. – No.2. – Pp. 25-28.
5. Вуд К.Д. Техническая аэродинамика / К.Д. Вуд // М.: Ученые записки ЦАГИ.– ЦАГИ, 1938. – 252 с.
5. Wood K.D. Technical aerodynamics / K.D. Wood // М.: Scientific notes of TsAGI.– TsAGI, 1938. – 252 p.
6. Карпенко В.П. Исследование гидродинамических характеристик распорных траловых устройств / В.П.Карпенко // Тр. ЦНИИТЭИРХ. Промышленное рыболовство. – М., 1973. – Т. 2. – С. 47-49.
6. Karpenko V.P. Investigation of hydrodynamic characteristics of spacer trawling devices / V.P.Karpenko // Tr. TSNIITEIRH. Industrial fishing. – М., 1973. – Vol. 2. – Pp. 47-49.
7. Патент RU210838U1 Рыбопромысловый траловый комплекс // Пелешенко Виталий Алексеевич
7. Patent RU210838U1 Fishing trawl complex // Peleshenko Vitaly Alekseevich