



УДК 629.12+004.94

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-114-128>

НАУКА И ТЕХНИКА

Возможности применения мультимодульных плавсредств-трансформеров в процессах освоения Мирового океана



Николай ОСТРОУХОВ



Екатерина ЧУМАКОВА

Остроухов Николай Николаевич – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва, Россия.

Чумакова Екатерина Витальевна – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва, Россия.*

Мультимодульные плавсредства-трансформеры на основе модулей с вихревыми двигателями могут составить новый класс плавсредств, который существенно расширяет диапазон достижимых параметров в производственных процессах, выполняемых в Мировом океане.

Составляемые из однотипных и способных функционировать автономно модулей с вихревыми двигателями плавсредства, во-первых, могут наращиваться до размеров и форм, недоступных для современных судов традиционной компоновки, а, во-вторых, при необходимости, не имеют ограничений по срокам автономности, так что по совокупности свойств они аналогичны искусственным островам в произвольной акватории Мирового океана, обладая при этом мобильностью.

Цель настоящей работы – оценка перспектив использования мультимодульных плавсредств-трансформеров как носителей технологических комплексов в научно-производственных процессах, выполняемых в Мировом океане.

Для мультимодульных плавсредств-трансформеров с вихревыми двигателями предложены модели их применения в режимах автономного круглогодичного непре-

рывного функционирования в произвольной незамерзающей акватории Мирового океана.

Для оценки эффективности использования предлагаемых плавсредств-трансформеров выполнено имитационное моделирование их функционирования, а также прямое сопоставление их характеристик с традиционными судами, обеспечивающими деятельность научно-производственных комплексов в Мировом океане. Для сопоставления выбраны известные на сегодняшний день морские комплексы, требующие длительного непрерывного функционирования (комбинат по добыче и переработке морепродуктов; предприятие по СПГ).

В работе показано, что применительно к рассмотренным процессам предлагаемые мультимодульные плавсредства-трансформеры обладают, по меньшей мере, двумя потенциальными преимуществами. Во-первых, они позволяют реализовывать непрерывное и длительное (определяемое непосредственным износом основного модуля) функционирование комплекса, а, во-вторых, в режиме автономного функционирования отдельных модулей зоной действия комплекса в целом оказывается акватория с характерным размером в сотни миль.

Ключевые слова: мировой океан, морской транспорт, мультимодульные плавсредства-трансформеры, добыча и переработка морепродуктов, донные металлические конкреции, добыча и переработка сжиженного природного газа.

*Информация об авторах:

Остроухов Николай Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры теоретической электротехники Московского авиационного института (национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва, Россия, vtvukde@mail.ru.

Чумакова Екатерина Витальевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической электротехники Московского авиационного института (национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва, Россия, ekat.v.ch@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 11.01.2019, актуализирована 08.10.2019, принята к публикации 14.10.2019.

For the English text of the article please see p. 122.

ВВЕДЕНИЕ

Мультимодульные плавсредств-трансформеры на основе модулей с вихревыми двигателями, описанные в [1], могли бы представлять собой новый класс плавсредств, который существенно расширяет диапазон достижимых параметров в производственных процессах, выполняемых в Мировом океане. В частности, они могут обеспечивать непрерывное длительное (в течение нескольких лет) функционирование производственных или научно-технических комплексов в произвольной незамерзающей акватории Мирового океана с поддержанием необходимой транспортной и других видов связи с управляющими центрами и заказчиками на суше. Предпосылки такого преимущества плавсредств-трансформеров состоят в том, что они: во-первых, на стадии проектирования могут быть скомпонованы оптимальными для конкретного производственного процесса, а, во-вторых, имеют большие по сравнению с универсальными судами производительность и экономичность специализированных модулей, выполняющих конкретные производственные операции.

Цель настоящей работы – качественный анализ возможностей совершенствования научно-производственных процессов освоения Мирового океана, в первую очередь перспективных, и оценка перспектив

использования мультимодульных плавсредств-трансформеров как носителей технологических комплексов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Комплекс по добыче и переработке морепродуктов

Одной из областей освоения Мирового океана, для которой очевидна возможность применения судов с вихревыми двигателями, является добыча морских биологических ресурсов в различных районах промысла.

Суда с вихревыми двигателями, снабжённые рыболовными тралами, по своим функциональным возможностям практически ничем не отличаются от судов традиционной компоновки и даже обладают главным преимуществом – значительно меньшим расходом топлива [1].

Однако наибольший интерес представляет комбинированное судно-трансформер, которое может выполнять роль плавучей рыбоперерабатывающей базы. Так, при сохранении состава технологического оборудования современной перерабатывающей плавбазы в промысловую флотилию включают набор однотипных судов-модулей (возможно различного размера), которые в зависимости от выполняемых задач могут объединяться в более крупное судно или функционировать автономно.

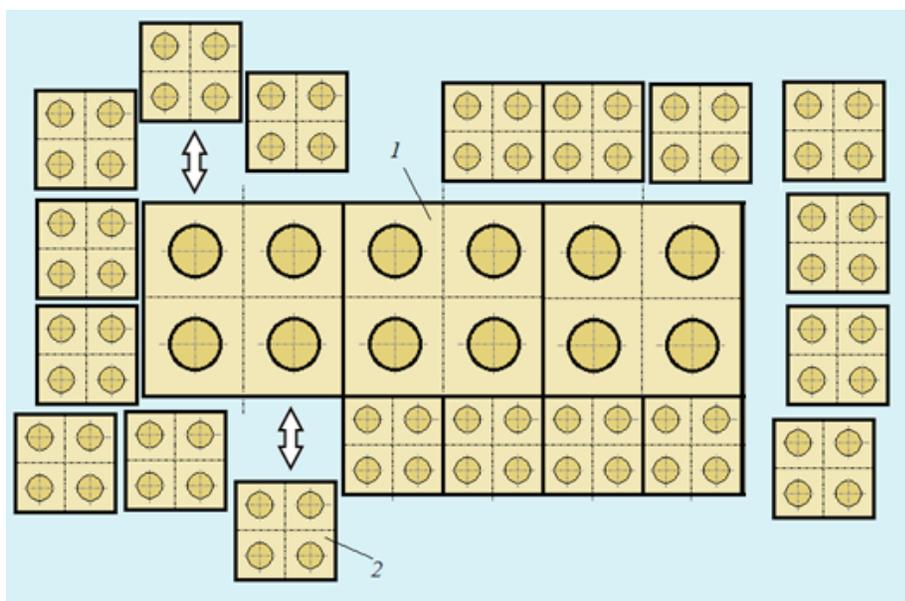


Рис. 1. Схема реализации мультимодульной флотилии рыбоперерабатывающего завода: 1 – центральный модуль плавбазы; 2 – промысловые и транспортные модули.

Традиционный рыбоконсервный плавучий завод представляет собой крупное судно большого водоизмещения (например, крабоконсервная плавбаза (КРКПБ) «Всеволод Сибирцев» водоизмещением 32 тыс. тонн), которое обслуживается 1–2 приёмно-транспортными судами и 10–12 промысловыми судами, а также наливным судном (танкером).

Сохраняя этот подход к промыслу и переработке морепродуктов, возможно использование 2–3 центральных крупных модулей, выполняющих функции плавучего завода, по периметру которых могут пристыковаться от 8–20 однотипных малых плавмодулей, выполняющих промысловые и транспортные функции (рис. 1).

Применение судов с вихревыми двигателями в рыболовном флоте имеет ряд очевидных преимуществ. Во-первых, лёгкая масштабируемость самого плавучего завода в зависимости от зоны и сезона промысла (т.е. от интенсивности улова). Плавучий завод может быть сформирован за счёт различного числа модулей (от одного до трёх и даже четырёх, больше нецелесообразно), от чего зависит общее водоизмещение, грузоподъёмность, объёмы помещений для хранения продукции, площади для размещения технологического оборудования и прочее.

Во-вторых, традиционные плавбазы и траулеры расходуют лишь порядка 30 % топлива на обслуживание технологического оборудования (механизированных линий, холодильных камер и т.п.), остальной объём затрачивается на движение. В то же время суда с вихревыми двигателями потребляют на движение в 2,5 раза меньше топлива [1]. Сравнивая расход топлива КРКПБ «Всеволод Сибирцев», который составляет порядка 5000 тонн за рейд в 9 месяцев, с аналогичным по габаритам и ходовым свойствам мультимодульным комплексом, видно, что для автономного функционирования в течение года необходимо не более 2500 тонн.

В-третьих, меньший расход топлива позволяет, по крайней мере, вдвое увеличить период автономного плавания в отличие от всё того же КРКПБ «Всеволод Сибирцев», который находится в рейде 9 месяцев в году. А при правильно организованной логистике транспортных модулей

(выполняющих отгрузку готовой продукции, смену экипажа, а также доставку топлива и прочих материальных ресурсов) можно обеспечить бесперебойное круглогодичное функционирование плавзавода вплоть до полного технологического износа оборудования плавмодулей.

Для определения оптимального числа модулей, формирующих флотилию плавбазы, построена имитационная модель, позволяющая оценивать эффективность производства продукции (объёмы выпускаемой продукции, загруженность линий) от состава флота, то есть от предполагаемого объёма вылова. Поведение системы в целом зависит от большого числа исходных параметров, таких, как удалённость промысла, габариты базы (число модулей, грузоподъёмность) и т.п., которые учитываются в модели и являются управляющими.

При построении имитационной модели предполагалось, что рыболовные сейнеры аналогичны по таким параметрам как водоизмещение, скорость, грузоподъёмность и объём вылова в сутки малым или средним рыболовным траулерами и регулярно выходят в рейсы-смены одинаковой продолжительности, по истечении которых добытые морепродукты поступают на переработку. Транспортные суда-модули отгружают продукцию на берег, как только её оказывается достаточно для полной их загрузки. Время отгрузки определяется удалённостью базы от берега. Принято, что основной модуль, выполняющий роль носителя технологического оборудования в месте близком к ареалу промысла, курсирует на одинаковом расстоянии от берега. При этом необходимость передвижения за скоплением рыбы, зависящая от зоны и сезона промысла, не известна и поэтому не учитывалась на данном этапе. Такое допущение конечно же может привести к определённым погрешностям полученных результатов, однако эти отклонения не критичны и не могут говорить о их общей недостоверности.

Объёмы вылова задаются случайной величиной, распределённой по показательному закону, со средним объёмом вылова, задаваемым в зависимости от вместимости и мощности промыслового модуля-траулера. В случае необходимости модель

Результаты моделирования

Объём полученной продукции за год, т (доставленная/в хранилищах базы)	84800/100	96800/7800	128000/300
Загруженность завода (из расчёта 22 ч/сутки)	0,47	0,57	0,71
Количество добывающих/транспортных модулей	8/4	10/2	12/4
Средняя загрузка транспортных судов	0,43	0,99	0,65
Средний объём переработки в сутки, т	230	290	350

может быть уточнена в соответствии с сезоном, интенсивностью вылова и колебанием запасов рыбы [2].

Рассмотрим результаты, полученные на основе моделирования функционирования судна-трансформера, схожего по параметрам и области промысла с КРКПБ «Всеволод Сибирцев». Сопоставимое по габаритам и водоизмещению судно (225 м в длину и 80 м в ширину) состоит из трёх модулей с роторами радиусом 22 м и межосевым расстоянием 40 м. Удалённость промысла задаётся в 1000 км от порта приписки. Роль сейнеров играют модули с несущими роторами диаметром 11 м (расчётной грузоподъёмностью 200 т для транспортных модулей и средним объёмом вылова 100 т для модуля трала). В таблице 1 приведены показатели производительности продукции в зависимости от количества модулей и их функционального распределения.

Из таблицы видно, что оптимизацией количества обеспечивающих судов можно довести загруженность основного перерабатывающего комплекса до 100 %. Теоретический максимум загруженности КРКПБ «Всеволод Сибирцев» не превышает 70 %.

2. Добыча донных полиметаллических конкреций

Донные отложения полиметаллических конкреций [3; 4] рассматриваются в настоящее время как важный и сравнительно доступный ресурс металлургической промышленности. Однако в арсенале добывающих отраслей промышленности в настоящее время нет отлаженных технологий сбора сырья, распределённого тонким слоем на морском (океаническом) дне, нередко на глубинах в сотни и тысячи метров. Очевидно, что при большом разнообразии месторождений конкреций [4] в настоящее время нельзя предложить универсальную технологию их разработки.

В [3] описана технология сбора и подъёма на поверхность конкреций с использованием так называемого кассетного трала, разработанная, судя по всему, для месторождений на слаборельефном морском дне. Сущность технологии и принцип работы кассетного трала представлены на воспроизводимом из [3] рис. 2.

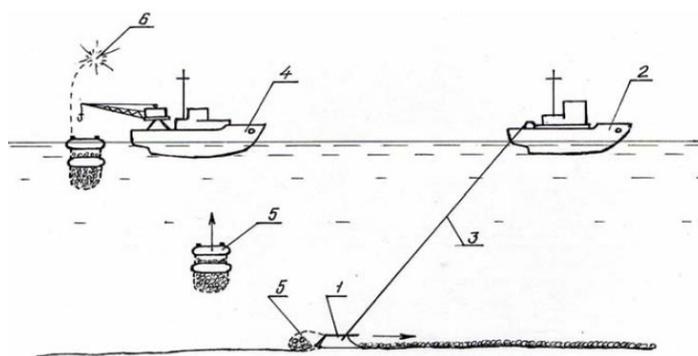
Из приведённых рисунков видно, что для сколько-нибудь полного извлечения конкреций вся поверхность месторождения должна быть «отсканирована» буксирным тралом, что при характерном размере месторождения L и ширине захватной части трала l требует не менее $N = L/l$ перемещений трала в перпендикулярном к L направлении. По совокупности характеристик месторождений и реальных размеров тралов число N не может быть меньше 10^3 .

Очевидно, что при буксировке трала универсальным судном традиционной компоновки, последнее для обеспечения N перемещений трала должно совершить, по крайней мере, то же количество односторонних рейсов. Существенно, что из-за конечной глубины акватории и наклонной ориентации буксировочного троса пробег судна больше расстояния, на которое перемещается трал. Кроме того, при каждом рейсе буксировочного судна оно должно разворачиваться в противоположном направлении. Наконец, рассматриваемая технология существенно усложняется необходимостью строгого совмещения каждой новой траектории перемещения трала с предыдущей.

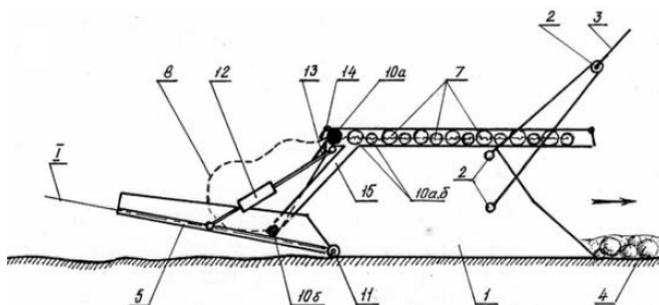
Таким образом, продуктивность одностороннего универсального судна на стадии извлечения конкреций кассетным тралом оказывается принципиально невысокой.

Мультимодульное плавсредство-трансформер может быть скомпоновано из условий максимальной эффективности разработки конкретного месторождения.

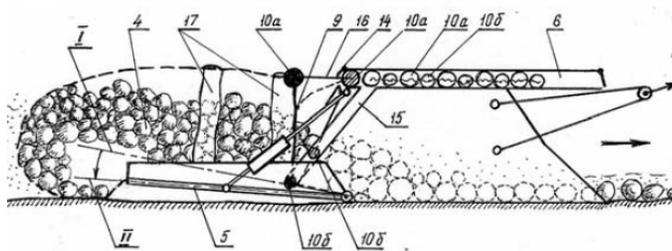




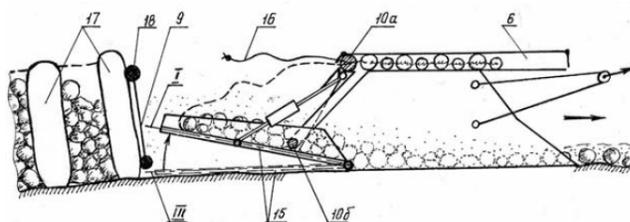
а)



б)

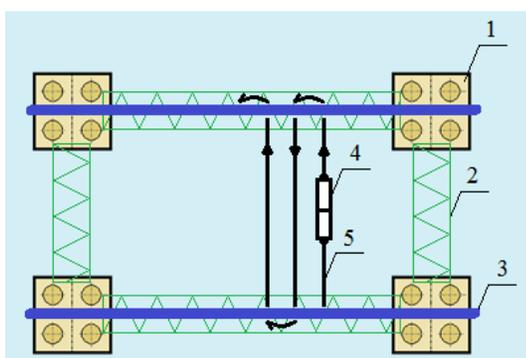


в)

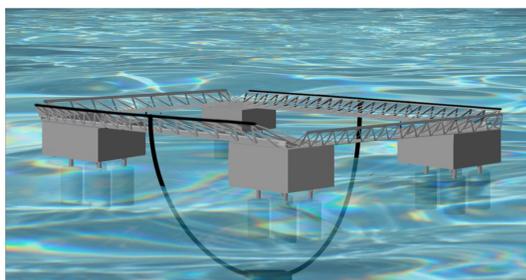


г)

Рис. 2. Принципиальные схемы [3]: (а) разработки месторождения конкреций кассетным тралом: 1 – кассетный ковш-черпак, 2 – буксирное судно, 3 – буксирный трос, 4 – судно-сборщик, 5 – всплывающие тралы, 6 – сигнальное устройство, 7 – залежь конкреций; (б–г) работа кассетного трала: 1 – ковш-черпак, 2 – узел крепления буксировочного троса, 3 – буксирный трос, 4 – конкреции, 5 – качающаяся плита, 6 – кассеты, 7 – тралы, 8 – высокопрочная сеть трала, 9 – гибкий каркас проходного сечения трала, 10а – верхний каток-держатель с баллоном сжатого воздуха, 10б – нижний каток-держатель, 11 – шарнир качающейся плиты, 12 – пружинная тяга, 13 – жёсткий упор-держатель, 14 – пружинная защёлка, 15 – наклонная часть кассеты, 16 – упругая тросовая тяга фал, 17 – подъёмные баллоны-ёмкости, 18 – баллоны со сжатым воздухом, I – рабочее положение плиты, II – загрузочное положение плиты.



а)



б)

Рис. 3. Модель структуры комплекса по извлечению донных металлоконкреций на основе модульного трансформируемого плавсредства: 1 – опорные модули с лебёдками для перемещения трала, 2 – распорные фермы, 3 – вали лебёдок, перемещающих трал, 4 – спаренный двухсторонний трал, 5 – буксировочный трос.

Модель структуры технологического комплекса представлена на рис. 3. Комплекс содержит, по меньшей мере, четыре опорных модуля, расположенных в вершинах прямоугольника со сторонами по осям модулей. Прямоугольник располагается над разрабатываемым участком месторождения конкреций, взаимное положение модулей зафиксировано распорными фермами. По двум параллельным сторонам комплекса над опорными фермами установлены вали лебёдок, перемещающих трал.

При описываемой структуре комплекса целесообразным представляется использование спаренного (двухстороннего) трала с двумя буксируемыми тросами, как это показано на рис. 3. Для перевода такого трала на встречную траекторию достаточно сдвинуть тянущие тросы в поперечном направлении (по валам тянущих лебёдок) приблизительно на ширину заборной части трала.

Описанная компоновка комплекса обеспечивает предельно полное извлечение конкреций с площади, охватываемой периметром комплекса при минимальных

энергозатратах, в частности, существенно меньших, чем при перемещении трала одиночным судном. Действительно, в последнем случае большая часть потребляемой мощности расходуется на перемещение самого судна, по размерам превышающего трал, по крайней мере, на порядок. Соответственно эффективная площадь, воспринимающая скоростной напор, а значит, и мощность, оказываются на 2–3 порядка больше мощности, потребляемой на перемещение трала. Кроме того, каждый отдельный пробег судна-буксировщика всегда больше длины траектории самого трала, по крайней мере, на длину натяжения буксировочного троса.

Оптимизация количества судов-модулей, формирующих опоры добывающего каркаса (зависящего от периметра сканируемой поверхности дна) и количества транспортно-доставляющих модулей (зависящего от дальности месторождения и объёмов добычи) представляется весьма простой задачей, а предложенная структурная модель комплекса, находящегося в стадии становления, не может быть кон-



кретизирована компьютерной моделью его функционирования при отсутствии данных о месторождении.

3. Комплекс по добыче сжиженного природного газа (СПГ)

По мере истощения и выработки традиционных мощных газовых месторождений [5] непрерывно возрастает актуальность разработок трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) газа, в частности, на сравнительно маломощных, но многочисленных шельфовых месторождениях природного газа.

В [5] довольно детально описан плавучий завод СПГ (Prelude FLNG), спроектированный и строящийся корпорацией Royal Dutch Shell* для разработки месторождения на шельфе Западной Австралии. Проект представляется, по сути, модификацией наземного завода, размещаемого на плавучем основании. В настоящее время он является крупнейшим из существующих плавучих объектов на Земле (водоизмещение 600 тыс. тонн). В целом, проект плавучего завода СПГ разработан применительно к одному конкретному месторождению из условия максимальной производительности при работе на нём. То есть, из условия выработки этого месторождения за минимальный срок. Принципиальная возможность перемещения завода на другое месторождение никак не подтверждается техническими характеристиками. В частности, само плавучее основание завода не имеет собственных ходовых движителей и перемещаться может лишь буксирами. По совокупности свойств плавучий завод СПГ оказывается условно мобильным и сложно перемещаемым при переходе к другому месторождению.

Несколько нелогичным для моноблочного завода представляется наличие в нём систем, состоящих из группы параллельно функционирующих одинаковых агрегатов (например, три электромотора, семь морских котлов Kawasaki, шесть танков для хранения СПГ и др.). Такая компоновка завода предполагает, кроме резервирования систем (хотя бы теоретически), его работу не на полную мощность с использованием лишь части систем, выполненных не в единствен-

ном экземпляре. При работе в режиме меньшей производительности неотделяемая часть «большого» завода, очевидно, снижает показатели эффективности всего комплекса.

Из сказанного следует, что эффективный плавучий завод СПГ, предназначенный для разработки различных месторождений, нецелесообразно выполнять по моноблочной схеме.

Мультимодульные плавсредства, предлагаемые в настоящей работе, представляются оптимальным вариантом плавучего СПГ-завода, проектируемого для разработки месторождений со сменой местоположения.

Для прямого сопоставления в работе предложена модель структуры многоцелевого мультимодульного плавсредства-трансформера суммарным водоизмещением 600 тыс. тонн, то есть равного описанному в [5; 6], состоящего из десяти модулей по 60 тыс. тонн каждый. Отдельный модуль, имеющий четыре несущих ротора диаметром 35 м с межосевым расстоянием 45–50 м (в поперечном направлении) и 60 м (вдоль), позволяет получить судно с габаритами: длиной – 515 м, шириной – 170 м.

В зависимости от мощности месторождения и оптимальной потребной производительности завод СПГ на мультимодульном основании может состоять из различного числа модулей от единичного до максимального числа (в данном случае – до десяти). При использовании единственного модуля технология вполне аналогична работе завода [5; 6]. При использовании нескольких модулей их целесообразно располагать по контуру, охватывающему площадь месторождения так, чтобы вся подводная (донная) инфраструктура была в пределах этого контура.

Очевидны некоторые сравнительные преимущества завода на адаптируемом (к месторождению) плавучем основании на основе плавмодулей. Во-первых, использование мощности завода (предприятия), соответствующей мощности месторождения, исключает непроизводительные затраты по обслуживанию неиспользуемых частей «большого» завода. Во-вторых, использование мультимодульного плавучего основания позволяет оптимизировать инфраструктуру подводной (придонной) части добывающего комплекса.

*См. также <https://www.shell.com/about-us/major-projects/prelude-flng.html/> – прим. ред.

Сделать количественную оценку снижения эксплуатационных расходов в общем случае невозможно, но принимая вариант убывающей от некоей начальной величины мощности месторождения (в диапазоне от 1 до 0), разрабатываемого одним плавучим заводом, сокращение расходов можно оценить в 50 %.

ВЫВОДЫ

1. Для основных направлений освоения Мирового океана предложено применение мультимодульных плавсредств-трансформеров с вихревыми двигателями. Показано, что такие плавсредства имеют значительные преимущества по сравнению с одиночными традиционными судами при выполнении длительных (вплоть до круглогодичных) непрерывных научно-технических проектов в произвольной акватории Мирового океана.

2. Выполнены оценки основных показателей функционирования для комплексов на основе модульных плавсредств по добыче и переработке морепродуктов, донных полиметаллических конкреций и СПГ. Показано, что во всех трёх рассмотренных процессах в сравнении с традиционными судами удельные энергетические, технологические и трудозатраты меньше. Сопоставление по сравнительно очевидной совокупности параметров позволяет оценить снижение транспортных расходов при переходе от универсальных судов к модульным в 60–80 %, а трудозатрат на выполнение технологических операций не менее чем в 50 %.

3. Указанные преимущества модульных плавсредств обусловлены оптимальным составом модулей, который определяется на основе модели функционирования комплекса. Кроме того, модульный принцип построения даёт возможность выполнения отдельных технологических операций (добыча морепродуктов, транспортировка готовой продукции и др.) отдельными специализированными модулями сравнительно малого водоизмещения, а также пребывания основного технологического модуля, по водоизмещению сравнимого с судами традиционной компоновки, в заданной акватории практически неограниченное время без регулярно-

го непроизводительного возвращения на сухопутную базу.

Данные выводы могут быть уточнены, доработаны или дополнены по мере проведения дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Остроухов Н. Н., Чумакова Е. В. Компоновочные схемы и эксплуатационные характеристики водных и воздушных судов с вихревыми двигателями // Мир транспорта. — 2018. — № 5. — С. 40–49.
2. Мельников А. В., Мельников В. Н. Управление запасами промысловых рыб и охрана природы: Учеб. пособие. — Астрахань: Изд. АГТУ, 2008. — 544 с.
3. Кириченко В. Ю., Каширский А. С. Технология добычи железомарганцевых конкреций с помощью кассетного троса // Гидромеханизация. Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск. — 2015. — № 11. — С. 114–121.
4. Базилевская Е. С. Исследование железомарганцевых руд океана // Труды Геологического института. — 2007. — Вып. 518. — 189 с.
5. Скоренко Т. Самый большой корабль в мире // Популярная механика. — 2014. — № 6. [Электронный ресурс]: <https://www.popmech.ru/technologies/16058-probuzhdayushchiy-ktulkhu/#part0>. Доступ 08.10.2019.
6. Shell's massive Prelude hull world's biggest-ever floating vessel and first ocean-based LNG plant, Financial Post (3 December 2013). [Электронный ресурс]: <https://business.financialpost.com/commodities/energy/record-breaking-lng-ship-launched-bigger-one-planned>. Доступ 08.10.2019.

От редакции:

Предлагаемая вниманию читателей статья, посвящённая постановке достаточно нового вопроса, представляется в определённой мере дискуссионной. Предложенные на обсуждение подходы к моделированию, носящие на начальном этапе объяснимо общий характер, в последующем будут нуждаться в более глубоком обосновании, аргументации принятых алгоритмов и допущений. Подлежит дальнейшему рассмотрению и детальное обоснование эффективности вихревого двигателя, его тяговых характеристик, КПД, в том числе и экспериментальное, — с учётом возможностей выполнения двигателя в виде оболочки на корпусе, связанной с приводным двигателем. Исходя из практики применения модульного принципа построения сложных систем, в том числе при постройке судов, должны быть учтены существенные ограничения его использования в части мореходных качеств: остойчивости, непотопляемости, допустимых характеристик качки и т.д.; обеспечения прочностных свойств мультимодульного объекта во всех, в том числе и экстремальных условиях; решения многокритериальной задачи, в которой оптимизация по одному параметру может существенно ухудшить другие показатели, вплоть до полной неоптимальности конструкции в целом; многократного дублирования систем и средств для безопасного функционирования каждого модуля; экономической эффективности мультимодульного объекта.

Вместе с тем, независимо от результатов обсуждения, сама постановка данных, во многом новых, вопросов, несомненно, может быть полезной для поиска связанных с ними эффективных решений.

