

УДК 629.12

DOI: 10.46960/2782-5477_2023_2_30

Е.С. Шишов, С.Н. Зеленов
ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА
ВЫБОРА ДВИЖИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ АМФИБИЙНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлен обзор применяемых сухопутных и водоходных движителей на амфибийных транспортных средствах. Рассмотрены характерные преимущества и недостатки применяемых движителей на машинах, а именно: колесные, гусеничные, роторно-винтовые сухопутные движители и гребные винты, направляющие насадки, водометные движители в качестве водоходных движителей. Сделано заключение о водометном движителе как перспективном для использования на амфибийном транспорте. Представлен оптимальный выбор движителя в зависимости от предъявляемых требований.

Ключевые слова: амфибийное транспортное средство, сухопутные движители, водоходные движители, сравнение движителей, эффективность движителей, оптимальный выбор, водометный движитель, перспективы применения водомета.

Введение

Амфибийная транспортная техника, передвигающаяся как по земле, так и по воде и воздуху, находит множество способов применения. Эти специальные машины используются, как правило, для преодоления водных преград, транспортировки в условиях полного бездорожья, а также в спасательных целях и для оборудования переправ. Наиболее широкое применение амфибийный транспорт получил для решения военных задач. Однако в последнее время наблюдается тенденция использования таких машин и в гражданской сфере. Их используют для транспортировки людей и грузов через водные преграды, как паромную переправу во время паводков, они полезны для освоения труднодоступных территорий, а также при ликвидации последствий катастроф и чрезвычайных ситуаций.

Впервые амфибийные транспортные средства появились в США в начале XIX в.: это были лодки на колесах с паровым двигателем и установленным в корме гребным колесом. Широкое распространение получили амфибии в XX в. в ходе военных действий в Первую и Вторую мировые войны. Такие машины в основном представляли из себя грузовые автомобили с водоизмещающим корпусом и установленным в задней части гребным винтом, находящегося в гидродинамической нише. Их главным назначением было выполнение десантных операций и обеспечение войск. Уже с середины XX в. помимо традиционного гребного винта на амфибиях, широкое распространение получили гребные винты в насадке и водометные движители.

Основные типы сухопутных движителей

Сухопутные движители можно разделить на три основных типа: колесные, гусеничные и роторно-винтовые (рис. 1) [1]. Наиболее распространены колесные движители – в силу своей простоты и меньших затрат на обслуживание по отношению к другим типам. Применение колесной базы позволяет создать комфортное быстроходное транспортное средство для движения на суше. Основным недостатком такой базы является малая грузоподъемность и высокий шанс повреждения шин, что приводит к неспособности к движению, а также малая проходимость из-за малой площади контакта с грунтом по сравнению с другими типами.

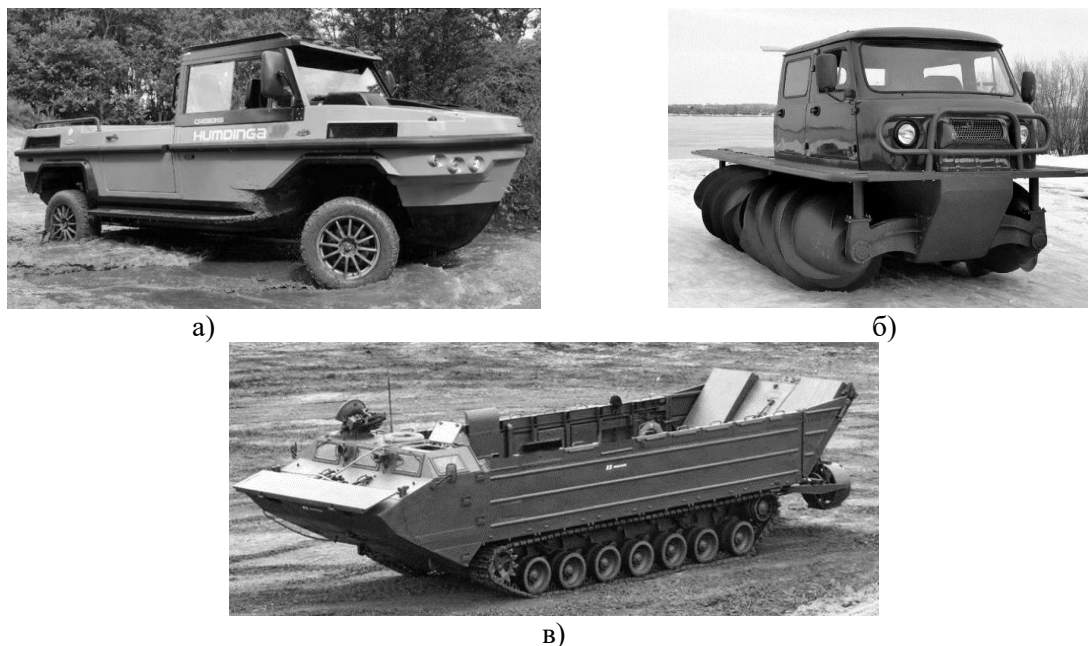


Рис. 1. Примеры амфибийных машин с различными сухопутными движителями:
а – колесный движитель на GIBBS Humdinga;
б – роторно-винтовой движитель на ЗВМ-2901; в – гусеничный движитель на ПТС-4

Гусеничный движитель распространен на более тяжелой технике, которая требует высокой проходимости по сравнению с колесными машинами. Основным его преимуществом является высокая грузоподъемность и повышенная проходимость и маневренность благодаря большей площади контакта с грунтом. Основной недостаток – малая скорость хода на суше, повышенный вес транспорта, высокая стоимость и сложность обслуживания [2].

Роторно-шнековый движитель обладает несравнимой проходимостью с гусеничными и колесными движителями. Данный тип движителя не получил широкого распространения, в связи со своим большим недостатком – невозможность передвижения по твердым поверхностям. Поэтому транспортные средства, оснащенные таким движителем, в основном применяются только в тех условиях, где не могут пройти движители, описанные ранее [3].

Основные типы водоходных движителей

По типу водоходных движителей различают: колесные, гусеничные, роторно-винтовые, гребные винты, гребные винты в насадках, водометные. Все эти движители создают движущую силу за счет реакции воды, отбрасываемой с приращением скорости в противоположную сторону к направлению движения транспорта, поэтому их можно отнести к движителям реактивного типа. Вследствие этого, данные водоходные движители имеют одинаковый принцип работы, основное отличие заключается в конструкции рабочего органа или самого агрегата, что сообщает ускорение воде. Эффективность водоходного движителя зависит от вида рабочего органа с характерными для них преимуществами и недостатками [1]. Чтобы подобрать наиболее эффективный движитель, необходимо учитывать для чего предназначается машина, ее тип, требования в скорости и маневренности, а также условия эксплуатации. Таким образом, водоходный движитель должен удовлетворять следующим требованиям:

- иметь малые размеры и массу;
- минимально уменьшать водоизмещение;
- обеспечивать необходимую силу тяги;

- обладать хорошим пропульсивным КПД;
- обеспечивать реверс хода и приемлемый уровень маневренности;
- быть простым по конструкции и удобным в обслуживании;
- иметь защиту от повреждений как на суше, так и на воде.

Колесный движитель, помимо применения на земле, используется на некоторых машинах в качестве водоходного движителя, обеспечивая достаточно малые скорости хода на воде. Основным его преимуществом является использование одного типа движителя в качестве сухопутного и водоходного, с функциями реверсивно-рулевого устройства на воде. Большой недостаток такого типа движителя – малая создаваемая сила тяги в связи с малой частотой вращения колес и неполное погружение в воду по сравнению с другими типами, что не позволяет достигать больших скоростей на воде. Кроме того, создаваемая сила тяги зависит от степени износа протекторов колес. Как правило, конструкцию шин проектируют так, чтобы обеспечить оптимальное движение по суше, без учета движения по воде. Это сильно сказывается на их эффективности в роли водоходного движителя. Повысить эффективность можно путем внесения дополнительных устройств в конструкцию колес, например, установить лопасти центробежного насоса внутри диска колеса, улучшив тем самым гидродинамические характеристики [1].

По аналогии с колесным аналогом, гусеничный движитель может использоваться на воде. При движении на плаву гусеницы, перематываясь, направляют поток воды в сторону, противоположную движению своими нижними ветвями, благодаря чему машина движется [4]. Наиболее совершенным в гидродинамическом плане является гусеничный движитель, в котором верхняя гусеничная ветвь расположена в специальном гидродинамическом кожухе, за счет уменьшения отрицательной тяги верхних ветвей и уменьшения сопротивления набегающего потока воды, верхними частями обводов. Даже несмотря на это, гусеничный движитель имеет сравнительно низкий КПД при движении на воде [1].

Роторно-винтовой движитель, также универсален и сочетает в себе сухопутный и водоходный движители. Он представляет собой во много раз увеличенный винт в виде полого водоизмещающего цилиндра, на котором навита резьба – винтовая лопасть. Эффективность роторно-винтового движителя на воде зависит от конструктивной формы обводов корпуса транспорта вокруг самого движителя. В этом случае корпус выполняет роль гидродинамической насадки. Также КПД зависит от величины погружения движителя, при его частичном погружении уменьшается рабочая поверхность винтовой поверхности и возникает аэрация – смешивание воздуха с водой вблизи движителя. Основное преимущество роторно-винтового движителя на воде – большее тяговое усилие по сравнению с гусеничными и колесными движителями, а также возникновение гироскопического момента при высоком числе оборотов двигателя, что в свою очередь уменьшает отклонение машины от прямолинейного направления движения. Из недостатков следует отметить то, что роторно-винтовой движитель на воде работает в полупогруженном состоянии, из-за сложностей, возникающих при выходе на сушу, что негативно влияет на его эффективность [3].

На сегодняшний день наиболее распространенным движителем для движения транспортных средств на воде является гребной винт фиксированного шага (рис. 2, а) [5], который по сравнению с рассмотренными ранее движителями обладает более совершенными гидродинамическими свойствами. Гребной винт применяется на амфибийных транспортных средствах как основной водоходный движитель в совокупности с сухопутным движителем. Как правило гребные винты располагают в кормовой части, либо один винт в диаметральной плоскости, либо два винта расположенных по бортам [6]. Они достаточно просты по устройству по сравнению с другими типами движителей и обладают наиболее высоким КПД среди применяемых движителей плавающих машин. Обычно КПД судовых гребных винтов находится в диапазоне 60...65 %, согласно [7], но при применении гребных винтов на амфибийных транспортных средствах это значение находится в пределах 25...30 %, что связано с бо-

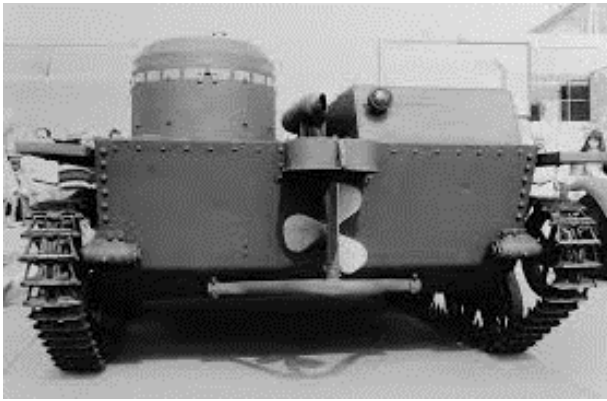
лее высокими коэффициентами нагрузки гребного винта, порядка 10...15, согласно [1]. Для повышения КПД гребного винта необходимо увеличивать его диаметр, тем самым повышая площадь гидравлического сечения движителя исходя из теории гребного винта, но в силу специфики работы и ограничений размеров кормовой части амфибийного транспорта невозможно разместить винт большого диаметра. Также следует учесть более сильное влияние элементов ходовой части и корпуса машины на эффективность движителя, по сравнению с винтами судов [1].

Расположение гребного винта в специальном туннеле (рис. 2, б) является промежуточным вариантом между традиционным открытым гребным винтом и водометным движителем, такое расположение винта позволяет получить более высокие пропульсивные характеристики, а также обеспечивается частичная защита от крупных объектов, которые могут попасть при нахождении вблизи береговой линии [1]. КПД винта, размещенного в туннеле, увеличивается по сравнению с открытым гребным винтом за счет сокращения зазора между кромкой винта и сводом туннеля, что уменьшает концевые потери на лопастях, находящихся под сводом. В тоже время возникает дополнительная вибрация из-за разности сил на лопастях, находящихся вблизи свода туннеля и тех что находятся внизу, что сказывается не лучшим образом на надежности пропульсивного комплекса [8]. Следует отметить и тот факт, что применение туннеля уменьшает водоизмещение транспорта на величину объема, который занимает туннель.

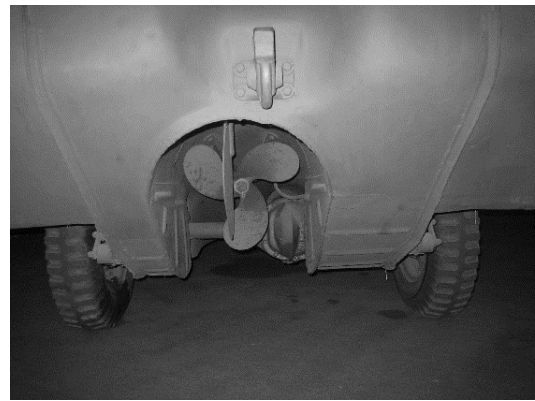
Широкое распространение на сегодняшний день получил и такой тип движителя – гребной винт в насадке (рис. 2, в), который по существу является водометом с предельно коротким водоводом [9]. Его направляющая насадка представляет собой замкнутое кольцо с аэродинамическим профилем, охватывающее концы гребного винта с небольшим зазором. Кольцо может быть исполнено в виде жестко закрепленной на корпусе машины или в виде поворотной насадки относительно винта или вместе с ним в качестве рулевого устройства. Гребной винт устанавливается в самом узком сечении насадки и при его вращении в каждом сечении насадки возникает сила в результате обтекания водой. Эта сила раскладывается на две составляющие – горизонтальную и вертикальную. Горизонтальная составляющая обеспечивает дополнительный упор пропульсивного комплекса, а вертикальная – создает поджатие потока воды, что положительно сказывается на пропульсивные качества. Применение направляющей насадки позволяет повысить тяговые показатели гребного винта в швартовном режиме до 30...40 % и 15...20 % при движении с максимальной скоростью, однако данные значения достижимы при равномерном неискаженном набегающем потоке воды и хорошо обтекаемыми элементами корпуса и ходовой части средства. В противном случае эффект от применения насадки может нивелироваться [1].

Наибольший интерес для использования в качестве водоходного движителя представляет водометный движитель (рис. 3). Он, как правило, предусматривает наличие водовода и водометной трубы. Водовод осуществляет забор окружающей жидкости, затем через устройство передачи энергии набегающему потоку, эта жидкость выбрасывается через направляющее устройство, в результате чего возникает реактивная сила, движущая машину в сторону, обратную направлению выброса жидкости [10].

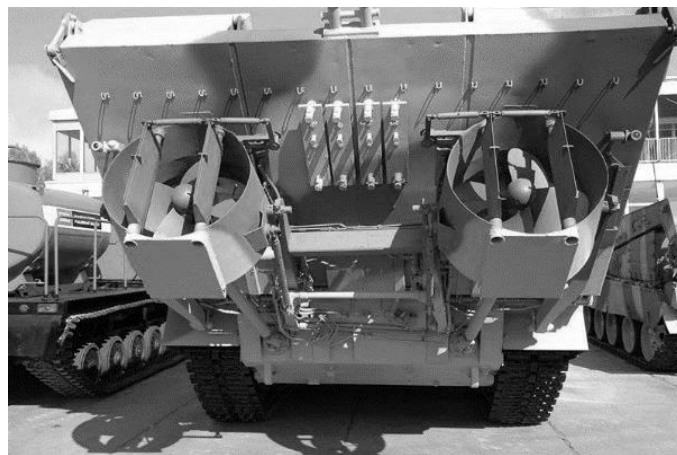
Согласно [9], водометные движители разделяют на две группы по способу передачи энергии потоку воды: гидрореактивные и с механическим рабочим устройством. Гидрореактивные двигатели ускоряют поток за счет подачи в него сжатого холодного газа или через подвод тепла с образованием парогазоводяной смеси. Механические рабочие устройства представлены двумя типами: вращающиеся (осевые и центробежные, диагональные насосы) и совершающие возвратно-поступательное движение (поршневые насосы). Наиболее распространена конструкция водомета, в которой используется статический водозаборник с защитной решеткой, с лопастным насосом (в основном осевые и диагональные) и наружным поджатием потока с полуподводным выбросом струи [10].



а)



б)



в)

Рис. 2. Применение гребных винтов на амфибных транспортных средствах:
 а – классический гребной винт на плавающем танке Т-38;
 б – гребной винт в туннеле плавающего автомобиля Ford GPA;
 в – гребные винты в насадке (в сложенном состоянии) плавающего транспортера ПТС-4

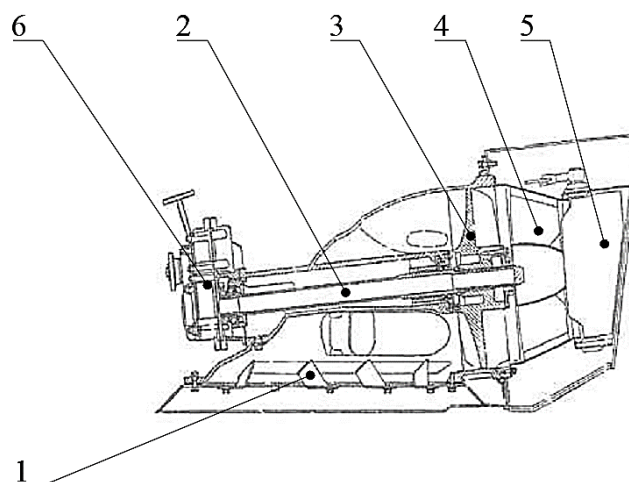


Рис. 3. Водометный движитель БТР-80
 1 – водозаборник с защитной решеткой; 2 – валопровод; 3 – импеллер;
 4 – спрямляющий аппарат; 5 – поворотная заслонка; 6 – редуктор

Основные преимущества и недостатки водометного движителя

Водометный движитель является перспективной альтернативой традиционным гребным винтам. Помимо применения на малых судах, он используется на амфибийных транспортных средствах благодаря весомым преимуществам по сравнению с другими типами движителей. По данным [11], уже около 40 % всех плавающих машин оборудовано водометными движителями.

К основным преимуществам водометного движителя можно отнести его высокую защищенность от повреждений как на суше, так и на воде, а также защищенность при входе в воду и выходе из нее [1]. Эти факторы обеспечивают его способность преодолевать небольшие перешейки, мели, заросшие травой участки водоемов. В условиях нашей страны это является весомым преимуществом, поскольку количество различных мелких, порожистых, засоренных рек и водоемов с каждым годом возрастает в связи с прогрессирующим обмелением. Использование классических гребных винтов в таких условиях невозможно и решением может быть только водометный движитель. Также к его преимуществам следует отнести высокую управляемость, которая не изменяется в зависимости от скорости хода и обеспечивается даже при отсутствии хода, в отличие от гребных винтов, которые лучше слушаются руля на пропорционально увеличению скорости. Водометные движители создают меньше вибраций и работают с пониженным уровнем шума, что положительно сказывается на эксплуатации транспорта [12]. Следует отметить возможность их использования в качестве водоотливных устройств для удаления забортной воды из корпуса и малую чувствительность к влиянию мелководья, течения и волнения на водной преграде [1].

К основным недостаткам водометного движителя следует отнести сложность и дороговизну конструкции, а также меньшие значения КПД по сравнению с гребными винтами [1]. У водометных движителей невозможно реверсировать направление силы упора путем изменения направления вращения рабочего колеса, вследствие чего необходимо применять специальные реверсивные устройства, отклоняющие реактивную струю на 180°, что дополнительно усложняет конструкцию. Следует учитывать также, что в насос водомета должна поступать вода, а не ее смесь с воздухом, которая резко снижает упор водомета. Чтобы избежать попадания воздуха, необходимо правильно спроектировать корпус машины. Еще одним недостатком водометного движителя является постоянный диаметр выходного сопла, который подобран на максимальные мощность и частоту вращения двигателя, что вызывает нелинейное изменение создаваемой тяги при изменении частоты вращения двигателя в отличие от гребного винта. Таким образом, на водомете сложнее получить промежуточные значения скорости машины [12].

Эффективность водометного движителя

По сравнению с открытым гребным винтом, водометный движитель имеет меньшее значение пропульсивного КПД [1]. Это снижение обусловлено сопротивлением водовода на малых скоростях движения, и лишь на более высоких скоростях хода на воде этот недостаток нивелируется и водометный движитель достигает более высоких значений КПД, когда в это же время происходит резкое снижение эффективности гребного винта, связанное с возникновением кавитации. В связи с этими особенностями водометный движитель используется на высокоскоростных судах. На рис. 4 представлены сравнительные характеристики водометного движителя и гребных винтов, а также сравнение его с движителями, которые не были рассмотрены ранее. Приемлемый уровень КПД водометного движителя достигается лишь для очень высокой скорости хода на воде, порядка 60...65 уз. (110...120 км/ч), которая недостижима для амфибийного транспорта на данный момент. Определение точного КПД водометного движителя является сложной задачей, поскольку необходимо рассматривать его применение в совокупности и во взаимодействии с корпусом машины. Поэтому разделяют четыре основные составляющие: 1) механический КПД, который определяется только конструкцией валопровода и не отражает гидравлические качества самого движителя; 2) КПД

струи водомета – пропульсивный КПД оптимального водометного движителя с учетом взаимодействия движителя с корпусом; 3) КПД водометного насоса; 4) КПД трубопровода, учитывающий потери энергии в соответствующих элементах движителя, которые не влияют на работу самого движителя, а только приводят к повышению потребляемой мощности.

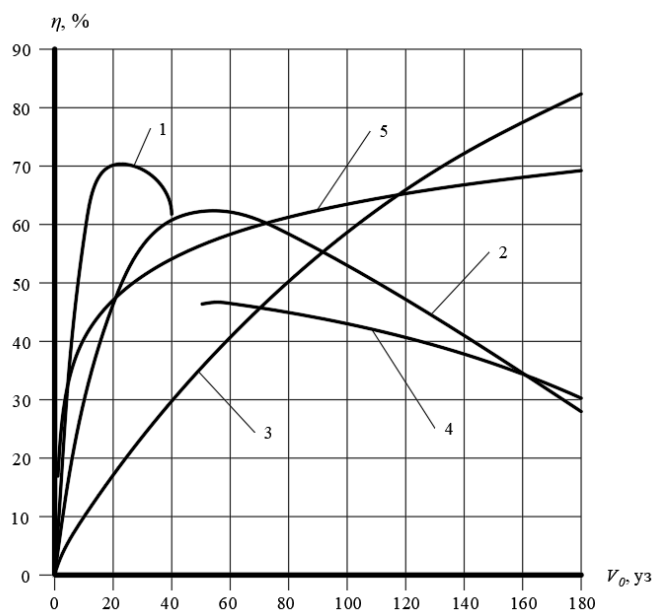


Рис. 4. Зависимость коэффициента полезного действия движителей от скорости хода
 1 – некавитирующий гребной винт; 2 – суперкавитирующий гребной винт; 3 – воздушный винт;
 4 – газоводометный движитель; 5 – водометный движитель

Исходя из теории идеального водометного движителя (движитель, у которого давление в струе на выходе равно давлению на бесконечности), можно увидеть, что пропульсивный КПД η_i идеального водометного движителя всегда выше идеального винта в свободной воде в зависимости от коэффициента нагрузки σ_{ei} (рис. 5). Пропульсивный КПД оптимального идеального водометного движителя (в трубе без зазора) зависит только от площади выходного сечения водометной трубы и не зависит от площади диска движителя.

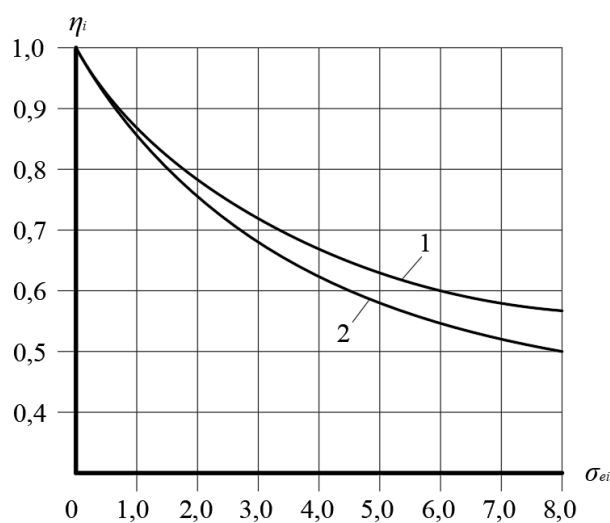


Рис. 5. Сравнение пропульсивных качеств идеальных движителей
 1 – идеальный водометный движитель; 2 – идеальный винт в свободной воде

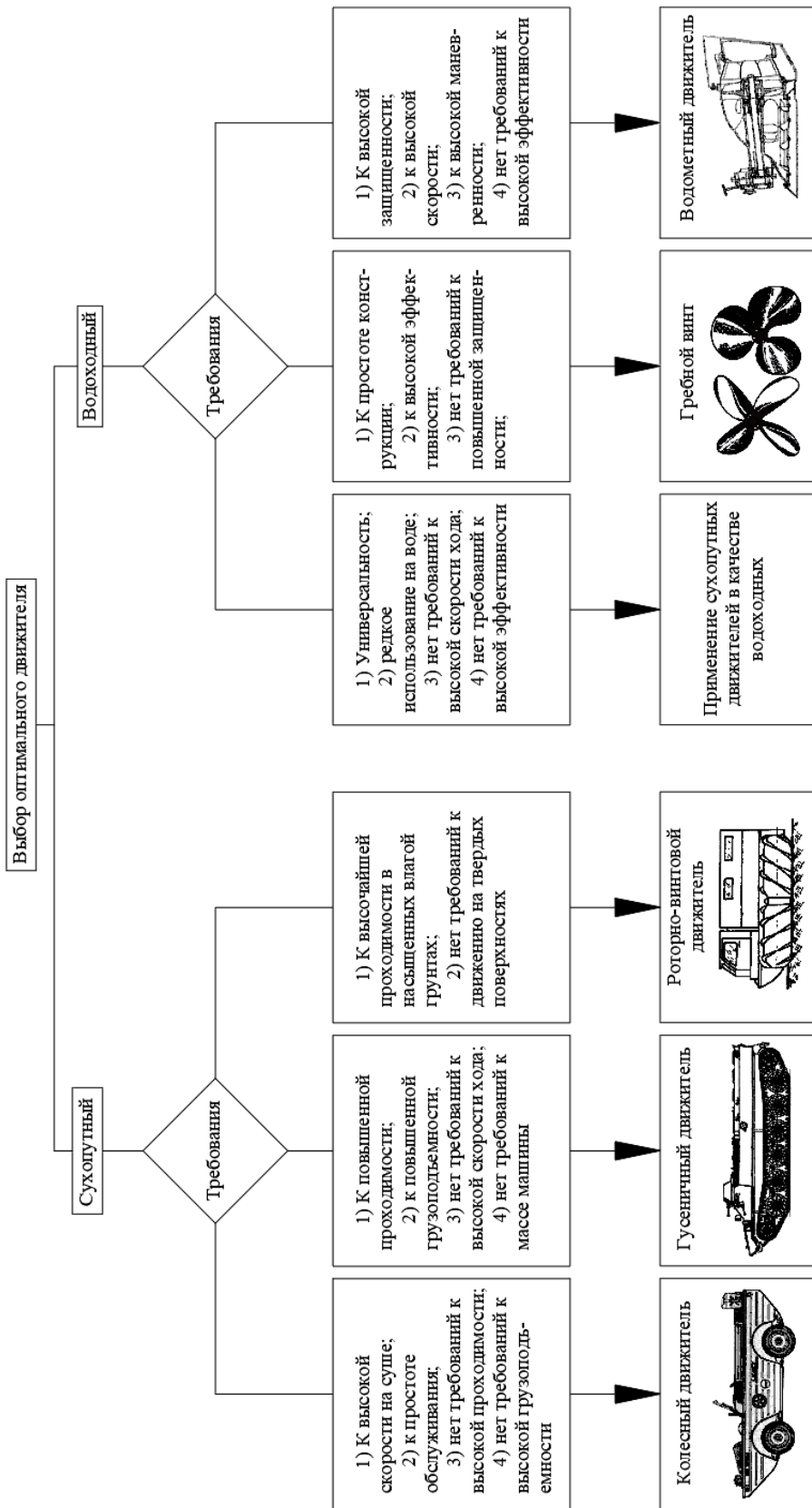


Рис. 6. Выбор оптимального двигателя амфибийного транспортного средства

Таким образом, значение пропульсивного КПД идеального водомета определяется размером выходного отверстия и не зависит от размеров насоса. Как говорилось ранее, в реальном водометном движителе учитываются взаимодействие с корпусом и потери в трубопроводе – это оказывает значительное влияние на пропульсивные качества движителя, и в действительности КПД этого движителя оказывается ниже, чем у соответствующего гребного винта. Исходя из этого, основным путем увеличения эффективности водомета является разработка проточной части водомета, которая при одинаковом оптимальном размере выходного отверстия (для максимального КПД) обеспечит минимум потерь энергии. Только в этом случае будут максимально использованы принципиальные преимущества этого типа движителя [13].

Заключение

На основе рассмотренных преимуществ и недостатков различных движителей, применимых для амфибийных транспортных средств, можно дать рекомендации по выбору оптимального движителя в зависимости от предъявляемых требований к транспорту (рис. б).

Проведенный обзор позволяет сделать вывод о перспективности применения водометных движителей в силу их высокой защищенности и маневренных качеств. Однако сложность их конструкции и относительно малая эффективность требуют дальнейшего рассмотрения вопроса о повышении пропульсивного КПД этого движителя. Можно предложить множество путей решения этой задачи, а именно: уменьшение сопротивления трения водовода, путем применения антифрикционных покрытий, которые бы одновременно предотвращали обрастание водовода органикой при долгом нахождении в воде. Возможно, также следует рассмотреть применение изменяемого диаметра соплового аппарата, что позволит повысить отзывчивость движителя на изменение числа оборотов двигателя для получения промежуточных значений скорости хода.

Библиографический список

1. **Степанов, А.П.** Конструирование и расчет плавающих машин / А.П. Степанов. – М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.
2. **Котович, С.В.** Движители специальных транспортных средств: в 3-х ч. Ч. II / С.В. Котович. – М.: МАДИ, 2021 – 184 с.
3. **Николаев, А.Ф.** Роторно-винтовые амфибии / А.Ф. Николаев, А.П. Куляшов. – Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1973. – 47 с.
4. **Юрко, С.В.** Ходовая часть боевой машины пехоты БМП-2: Учебное пособие / С.В. Юрко, В.Р. Стефанович. – Минск: БНТУ, 2010 – 24 с.
5. **Антоненко, С.В.** Судовые движители: Учебное Пособие / С.В. Антоненко. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 126 с.
6. **Артюшков, Л.С.** Судовые движители: Учебник / Л.С. Артюшков, А.Ш. Ачкинадзе, А.А. Русецкий. – Л.: Судостроение, 1988 – 296 с.
7. **Бендус, И.И.** Теория и устройство судна: Конспект лекций. В двух частях. Часть 1. 2-е изд., перераб. и доп. / И.И. Бендус – Керчь: КГМТУ, 2006 – 193 с.
8. **Ривкинд, Э.Н.** Защита гребного винта туннелем // Катера и яхты. 1974. № 3(49). С. 40-42
9. **Куликов, С.В.** Водометные движители (теория и расчет) / С.В. Куликов, М.Ф. Храшкин. – Л.: Судостроение, 1980. – 312 с.
10. **Анчиков, С.Л.** Водометные движители. Вопросы проектирования / С. Л. Анчиков. – СПб.: Реноме, 2021. – 252 с.
11. **Васильев, В.Ф.** Водометные движители / В.Ф. Васильев. – М.: МАДИ, 2006 – 45 с.
12. **Хорхорин, Е.Г.** Стационарные водометы. Справочник / Е.Г. Хорхорин. – М.: «Издательский Дом Рученькиных», 2004. – 160 с.
13. **Папир, А.Н.** Водометные движители малых судов / А.Н. Папир. – Л.: Судостроение, 1970 – 256 с.