

Вентилируемые водометные движители

У наиболее распространенных типов движителей — гребного винта и водометного движителя (ВД) — при работе вблизи свободной поверхности воды в гидравлическое сечение неизбежно попадает атмосферный воздух, что ведет к падению тяговых характеристик. При эпизодическом попадании воздуха к гребному винту и рабочему колесу ВД их характеристики становятся нестабильными. При прорыве воздуха может не только измениться режим работы движителя, но и резко усиливаться вибрация. Поэтому гребные винты принято настолько заглублять под поверхность воды, чтобы воздух при эксплуатации судна не попадал в их гидравлические сечения. Для предотвращения прорыва воздуха ВД снабжают специальными устройствами. При этом используются громоздкие, выступающие под днищем судна детали (гребные валы, кронштейны, заглубленный водозаборник и т. п.), которые существенно снижают эффективность движителя из-за большого сопротивления. Например, доля сопротивления выступающих частей судна при скорости хода 40–50 уз доходит до 20–30% полного сопротивления воды судну.

Во избежание ухудшения гидродинамических характеристик были разработаны движители, приспособленные для работы вблизи свободной поверхности воды, элементы которых имеют постоянный контакт с атмосферным воздухом, а именно: частично погруженные гребные винты (ЧПГВ) и вентилируемые водометные движители (ВВД). Гидродинамические характеристики этих движителей практически не изменяются при попадании воздуха в гидравлическое сечение.

Стабильная работа этих движителей обеспечивается за счет того, что их упор создается в основном повышенным давлением на нагнетающих сторонах лопастей. На засасывающих сторонах лопастей возникают воздушные каверны, смыкающиеся с атмосферой. Поэтому поступление к ним воздуха с потоком воды не приводит к значительному изменению давления и гидродинамических характеристик движителя. Благодаря этому ЧПГВ и ВВД можно располагать непосредственно у поверхности воды и тем самым уменьшить до минимума размеры выступающих частей, а вследствие их малого сопротивления достичь высокой эффективности.

У ЧПГВ в воду погружена только нижняя часть диска, верхняя же его часть, включая ступицу, в большинстве случаев находится выше поверхности воды. Малое использование площади диска движителя ведет к необходимости увеличения его диаметра и, соответственно, веса. Кроме того, при входе лопастей в воду возникают значительные ударные нагрузки и на гребной винт действует значительная боковая сила, в результате чего появляется необходимость на однонаправленных судах двигаться прямым курсом с переложением рулем, что несколько снижает эффективность ЧПГВ.

Конструктивно ВВД состоит из водовода, на выходном сечении которого располагается рабочее колесо на гребном валу. Спрямолинейный и сопловой аппараты, характерные для традиционных ВД, отсутствуют. Функции соплового аппарата выполняют воздушные каверны, образующиеся на засасывающей стороне лопастей при контакте

Общий вид катера “Каверна”



Основные данные катера “Каверна”

Длина габаритная, м	12.9
Ширина габаритная, м	3.1
Высота борта на миделе, м	1.2
Осадка, м	0.41
Водоизмещение, т:	
полное	5.0
порожнем	2.95

струи движителя с атмосферным воздухом. Рабочее колесо ВВД, как и большинства ЧПГВ, имеет лопасти с клиновыми сечениями, на выходящих кромках которых возможна установка интерцепторов, обеспечивающих изменение гидродинамических характеристик движителя в широких пределах. ВВД благодаря конструктивным особенностям и характеру их обтекания можно по-разному компоновать с корпусом судна. Так, ВВД может полностью располагаться внутри корпуса судна или вне его либо частично выступать в виде короткой насадки под днищем (рис. 1, а-в).

При компоновке ВВД непременным условием является контакт струи движителя с атмосферным воздухом на расчетном режиме движения судна. Иными словами, на основном режиме движения должен обеспечиваться надводный или полупогруженный выброс струи движителя. Воздух со стороны

Рис. 1. Схемы компоновки ВВД

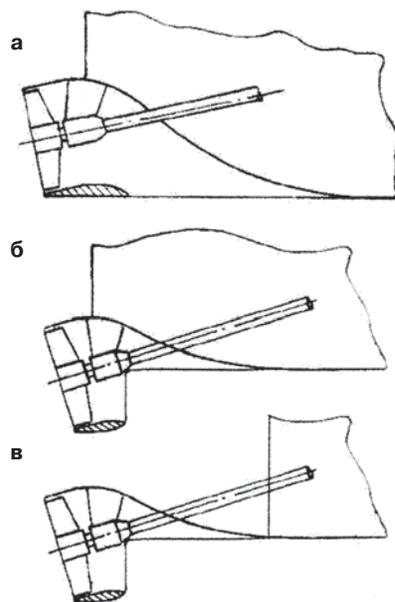
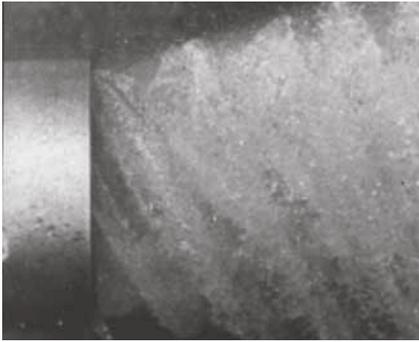




Рис. 2. Струя ВВД при ее надводном выбросе



выбросного участка водовода попадает к лопастям рабочего колеса и образует на них воздушные каверны, смыкающиеся с атмосферой; поток за двигателем разделяется этими кавернами на отдельные винтообразные струи (рис. 2).

Весь диск рабочего колеса ВВД в отличие от ЧПГВ омывается потоком воды благодаря наличию водозаборника. Поэтому отсутствуют ударные нагрузки на его лопасти и боковые силы на двигателе, а также уменьшение гидравлического сечения двигателя, характерное для частичного замыка диска ЧПГВ.

У ЧПГВ и ВВД, лопасти которых вентилируются атмосферным воздухом, зависимость тяги от скорости хода при заданной частоте вращения вала отличается от аналогичной для традиционных гребных винтов и ВД — максимум тяги не соответствует швартовному режиму. Типичная зависимость тяги и момента от скорости в безразмерном виде, полученная в результате испытания модели ВВД, приведена на рис. 3.

В связи со снижением тяги двигателя при малых скоростях создаются определенные сложности при проектировании ВВД. Элементы двигателя следует выбирать не только из условия получения максимальной скорости хода судна, но и тяги, достаточной для его уверенного разгона. Особое значение это имеет для судов с динамическими принципами поддержания (глиссирующих, судов на воздушной подушке и т. д.), у которых на малых скоростях имеется зона повышенного сопротивления, так называемый "горб сопротивления".

В настоящее время нет достаточно надежного теоретического метода расчета элементов ВВД, и с этой целью используются результаты систематических испытаний моделей. На рис. 4 приведена диаграмма тяговых характеристик рабочих колес ВВД, построенная по результатам испытаний серии моделей рабочих колес, отличающихся шаговым отношением. Как видно, ВВД имеют достаточно высокий КПД (0,6–0,7), что с учетом малого сопротивления выступающих частей делает его весьма эффективным.

Поскольку воздушные каверны на лопастях рабочего ВВД смыкаются с атмосферой, давление в них равно атмо-

Рис. 3. Кривые действия рабочего колеса с шаговым отношением $H/D=1.2$ при атмосферном давлении. K_T — коэффициент тяги (упора) ГВ; K_q — безразмерный коэффициент момента ГВ; η — коэффициент полезного действия

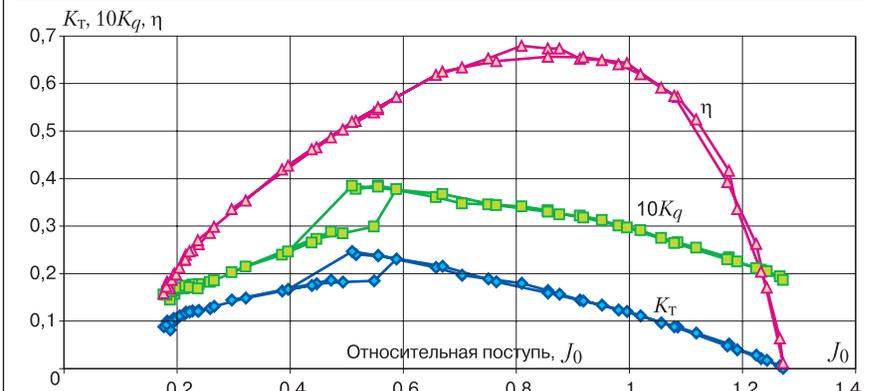
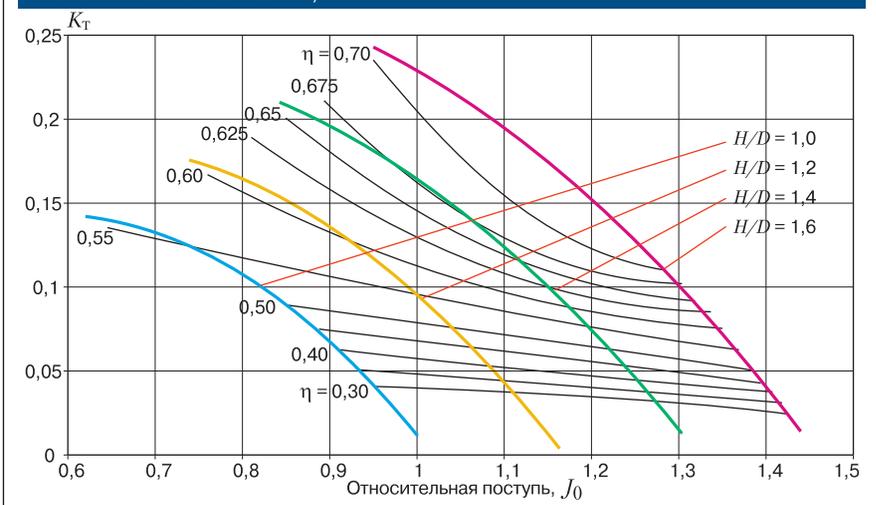


Рис. 4. Диаграмма кривых K_T рабочих колес с различным шаговым отношением H/D



ферному, что соответствует нулевому числу кавитации независимо от скорости хода судна. Поэтому теоретические безразмерные характеристики ВВД должны быть одинаковыми при разных числах кавитации, рассчитанных по традиционной схеме. Однако опыт показывает, что в ряде случаев наблюдается расхождение кривых действия, полученных по испытаниям модели при различных числах кавитации. Кроме того, это расхождение существенно меньше, чем изменение характеристик традиционных гребных винтов (ГВ) при возникновении паровой кавитации на лопастях. Небольшая зависимость характеристик от числа кавитации практически снимает ограничения использования ВВД по верхнему пределу скорости и, соответственно, мощности.

Эксперименты показали, что для изменения характеристик ВВД в достаточно широком диапазоне режимов не обязательно принимать новое рабочее колесо с другим шагом. Эту проблему можно решить, установив интерцепторы на выходящих кромках лопастей (рис. 5).

Эффективность установки интерцептора видна из рис. 6, на котором приве-

дены кривые действия одного и того же рабочего колеса с интерцепторами различной высоты.

Следует отметить, что вентиляция лопастей рабочего колеса воздухом практически исключает возможность возникновения паровой кавитации, в результате ВВД становятся менее шумными, чем кавитирующие гребные винты, т. е. экологически более чистыми. Кроме того, отпадает опасность разрушения элементов двигателя, что в ряде случаев существенно повышает эксплуатационную надежность судна.

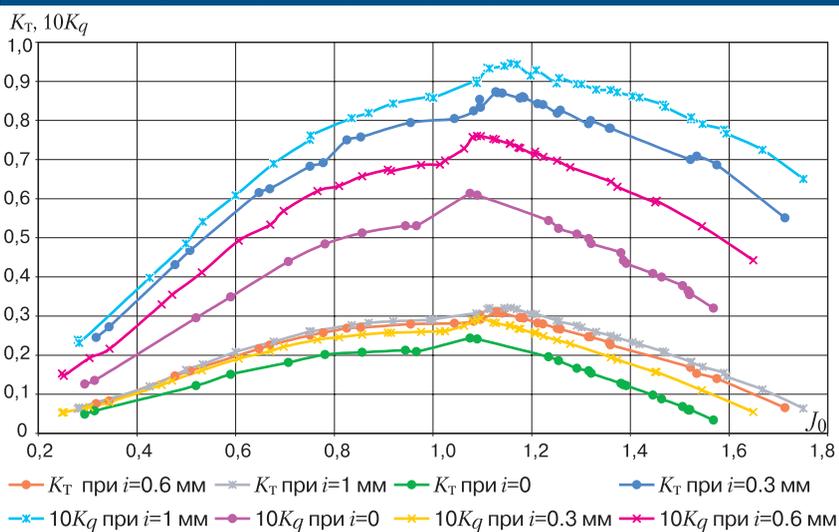
Указанные особенности ВВД при относительной простоте конструкции делают привлекательным их использование на скоростных судах.

Кроме модельных испытаний в лабораторных условиях были проведены испытания макетов ВВД в натурных усло-

Рис. 5. Профиль сечения рабочего колеса ВВД с интерцептором



Рис. 6. Гидродинамические характеристики рабочего колеса (шаговое отношение $H/D = 1.6$) с интерцепторами различной высоты i



виях и опытного образца на скеговом судне на воздушной подушке КВП-11. Полученные результаты полностью подтвердили перечисленные преимущества ВВД. В настоящее время ВВД установлены на катерах с газовой каверной под днищем “Серна” и “Каверна”, на которых были проведены наиболее полные испытания (рис. 7 – 10).

Принятая компоновка ВВД (рис. 7) на этом катере определялась требованием не нарушать целостность корпуса. На внешней подвеске за транцевой кормой катера “Каверна” были смонтированы два опытных образца ВВД с рабочими колесами диаметром 0,37 м, противоположного направления вращения, приводимыми во вращение двигателями ГАЗ-13 приводной мощностью $N_e = 140$ л.с. каждый, через понижающие редукторы УРРП-22-1,5 с передаточным отношением 1:1,5525. При этом максимальная частота вращения вала двигателя $n_{дв} = 4000$ об/мин. ВВД должны были обеспечить скорость хода катера не менее 50 км/ч. Оборудованный ранее осевым ВД катер развивал максимальную скорость хода 47 км/ч при мощности двигателя $N_e = 210$ л.с.

При решении вопросов управления судами, оборудованными ВВД, на различных режимах движения необходимо

учитывать ряд специфических особенностей. На ВВД отсутствует сопловой аппарат, сужающий выходную струю движителя, площадь которой близка к площади рабочего колеса, что обуславливает большие размеры реверсивно-рулевого устройства обычного типа. Поэтому реверсирование тяги судов с ВВД возможно путем изменения направления вращения рабочих колес по аналогии с гребными винтами. Для создания требуемой тяги при реверсе движитель должен быть полностью погружен в воду, что и обеспечивается в предлагаемой компоновке движителя на корпусе катера.

Для управления катером “Каверна” были использованы в качестве рулевого устройства (РУ) полукольцевые рули, установленные за выходящей кромкой водовода каждого движителя со стороны ДП катера. Для создания боковой силы руль вдвигался в струю движителя поворотом вокруг оси. При этом за счет повышения давления на обтекаемой поверхности руля часть струи движителя отклоняется от первоначального направления движения и создается боковая сила. Надо заметить, что при маневрировании перекладка руля производится на движители внутреннего борта. Момент, разворачивающий судно, возникает под действием боковой силы на руле и разнотяговости движителей.

Испытания опытных образцов ВВД с РУ на катере “Каверна” проводились в районе Горьковского водохранилища и устья р. Троиц. В ходе их были оценены эффективность работы движительно-рулевого комплекса и его влияние на следующие качества судна: ходкость, мореходность, маневренность. Кроме того, проверялась возможность движения



Рис. 7. ВВД катера “Каверна”

судна под одним работающим движителем.

Испытания по оценке ходкости проводились на мерной миле на тихой воде при слабом ветре. Катер при установившейся скорости движения и заданных оборотах главных двигателей пересек створы мерного участка, расположенные через 100 м, при этом по двум секундомерам отмечалось время прохождения между створами. Скорость определялась как среднее значение, вычисленное с учетом показаний секундомеров.

Как показали результаты испытаний, катер “Каверна” развивал максимальную скорость $V = 53$ км/ч при $n = 2350$ об/мин, при этом давление в каверне под днищем не превышало 155 мм вод. ст. (рис. 8 и 9).

Рис. 8. Зависимость скорости движения катера от частоты вращения движителей правого (▲) и левого (●) бортов

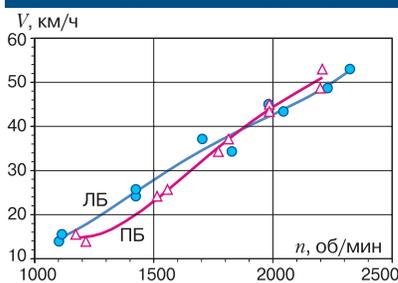
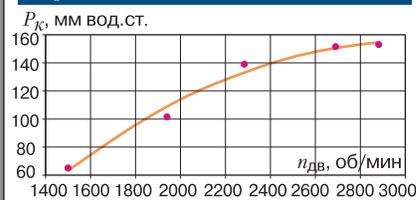


Рис. 9. Зависимость давления в каверне под днищем катера от частоты вращения вала двигателя правого борта ($x_g = 0.396$; $D = 5.2$ т)



Во время испытаний определялись также характеристики местной вибрации в районе размещения ВВД, на обечайке которого устанавливались датчики измерения вибрации.

Измерение частоты вибрации ВВД в районе кронштейна гребного вала левого борта показало, что основным источником вибрации являются двигатели. Измеренная частота вибрации 30–50 Гц близка к частоте вращения коленчатых валов двигателей (20–60 Гц).

При движении на тихой воде с одним работающим движителем левого борта катер двигался со скоростью $V = 28.8$ –36 км/ч, при этом уверенно держался на курсе и совершал повороты на оба борта.

Реверсирование судна осуществлялось путем изменения направления вращения гребного вала с помощью реверс-редуктора. Испытания на заднем ходу подтвер-



дили возможность такого движения судна, оборудованного ВВД, как на тихой воде, так и против ветра и волнения. При этом катер удовлетворительно маневрировал и держался на курсе при использовании разнотяговости движителей.

Маневренность оценивалась посредством движения катера на циркуляции при различных режимах работы двигателей. В результате определялись характер траектории, уровень забрызгиваемости и наличие опасных углов крена. Оценивались маневренные свойства судна и при движении под одним работающим движителем. Испытания по определению параметров циркуляции проводились при скорости $V = 18$ км/ч и частоте вращения гребных валов движителей $n = 1800$ об/мин. Вход в циркуляцию совершался в режиме переднего хода для обоих ВВД. Диаметр циркуляции $D_{ц} = 100$ м (~ 8 длин катера).

Оценка мореходности проводилась при полном водоизмещении (рис. 10). При этом определялись:

- скоростные характеристики катера, режимы работы ВВД и двигателей при движении на различных уровнях волнения и курсовых углах хода относительно волны;

- регистрировались параметры бортовой и килевой качки;

- проверялась маневренность катера при ветре и волнении;

- определялись минимальная скорость устойчивого движения на курсовых углах 0, 90, 180° при данной скорости ветра, а также уровень забрызгиваемости и наличие опасных углов крена.

Высота волн в районе испытаний составляла $h_{в}3\% = 350-420$ мм при ветре западного направления до 6–12 м/с. Наиболее благоприятным, комфортным для пассажиров был курсовой угол хода по волне, при котором отсутствовали перегрузки и забрызгиваемость кокпита. Заданная скорость движения $V = 43.2$ км/ч обеспечивалась при частоте вращения вала двигателя $n_{дв} = 3150$ об/мин, колебания по крену и дифференту не наблюдались. При ходе

против ветра скорость движения катера $V = 43.2$ км/ч обеспечивалась при $n_{дв} = 3400$ об/мин, давление в каверне составляло 70–90 мм вод. ст. Качка практически отсутствовала. При прохождении катером отдельных групп волн наблюдались удары в районе носовой оконечности. Максимальные перегрузки при скорости $V = 43.2$ км/ч не превышали $2g$. При ходе лагом к волне наблюдалось интенсивное забрызгивание кокпита мелкодисперсными брызгами. Перегрузка и колебания по дифференту практически отсутствовали, амплитуда колебаний по крену не превышала 5°.

Во время мореходных испытаний было отмечено, что ВВД стабильно работает при движении катера на волнении, при этом изменение скорости вращения гребного вала не превышает 1.5% номинала. В целом движение катера “Каверна”, оборудованного ВВД, в условиях волнения было вполне комфортным.

После проведения программы испытаний ВВД был визуально осмотрен — на рабочих колесах и водоводе движителя эрозионных разрушений не обнаружено, что говорит об отсутствии паровой кавитации.

Таким образом, анализ результатов натурных испытаний позволяет сделать следующие выводы:

- катер с полным водоизмещением 5–5.2 т, оборудованный двумя ВВД, приводимыми во вращение двигателями с приводной мощностью $N_e = 140$ л.с. каждый, развивает скорость не менее 50–53 км/ч при частоте вращения гребных валов движителей $n = 2100-2300$ об/мин;

- ВВД обеспечивает устойчивое движение катера при одном работающем двигателе;

- ВВД имеет стабильный характер

Рис. 10. Катер “Каверна” при движении на волнении



работы при движении катера на волнении, при этом изменение скорости вращения гребного вала не превышает 1.5% номинала;

- ВВД обеспечивает устойчивое движение судна на заднем ходу путем изменения направления вращения гребного вала;

- испытания подтвердили эффективность работы полукольцевых рулей, при этом диаметр циркуляции составляет $8L_{КВЛ}$.

- отсутствие эрозионных разрушений на рабочих колесах ВВД (поскольку на их лопастях паровой кавитации не было) свидетельствует об экологической чистоте движителя.

Созданию движителей, по принципу действия аналогичных ВВД, уделяется внимание в странах, обладающих передовыми технологиями и опытом создания движителей для скоростных судов. Это подтверждают публикации в зарубежных технических изданиях, в последнее время появляются и движители, аналогичные по принципу действия ВВД. Так, в 2000 г. напечатана статья об испытании модели, подобной ВВД, в кавитационной трубе при исследовательском центре Дэвида Тейлора (США), результаты которых подтвердили его высокий КПД. В 2001 г. в журнале “Speed at Sea” опубликована статья о разработке и внедрении гидроаэродвижителя (Hydro Air Drive).

**Марат Мавлюдов,
Ольга Яковлева**