

Министерство высшего и среднего специального
образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

В. М. АБРАМОВ

**ШВАРТОВНЫЕ ИСПЫТАНИЯ
ГЛАВНЫХ СУДОВЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК
НА ХОДОВЫХ РЕЖИМАХ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1962

ВВЕДЕНИЕ

Процесс испытания главных судовых силовых установок составляет значительную долю времени в общем цикле постройки судна. В зависимости от типа машинной установки и величины серии строящихся судов длительность этих испытаний составляет 10—25% общей продолжительности постройки судна.

Совершенствование судов в направлении увеличения скорости хода и уменьшения веса судовой силовой установки на тонну водоизмещения влечет за собой непрерывное ее усложнение. Это приводит к тому, что в процессе испытания судна значительная доля времени затрачивается на устранение неизбежно возникающих в процессе монтажа дефектов, на наладку механической установки и выполнение различных режимов ее работы с целью проверки исправности и надежности действия всех входящих в ее состав механизмов, аппаратов, систем и устройств.

Указанные работы выполняются в основном на ходовых испытаниях, так как при работе на швартовах невозможно получить спецификационных мощности и числа оборотов, обеспечивающих полноценную проверку механической установки в действии соответственно эксплуатационным режимам ее работы.

Сокращение продолжительности ходовых испытаний является одной из актуальных задач современного судостроения. Сократить длительность ходовых испытаний можно путем перенесения части работ, выполняющихся на ходу судна, на период швартовных испытаний. Это дает возможность совместить работы по достройке судна с процессом его испытания, т. е. сократить время, которое дополнительно тратится на проведение ходовых испытаний. Если еще учесть, что в период ходовых испытаний может сложиться неблагоприятная метеорологическая обстановка, приводящая к вынужденным простоям, а сами испытания проводятся с дополнительными затратами на сверхурочные часы и оплату командировочных, то целесообразность перенесения наиболее возможного объема работ с ходовых испытаний на швартовные становится вполне очевидной.

В последнее время на судостроительных заводах применяются различные способы разгрузки гребного винта, дающие возможность при работе на швартовах воспроизвести ходовые режимы работы главных двигателей.

В диссертационной работе рассмотрены все существующие способы разгрузки гребного винта, работающего в швартовном режиме, проведена их систематизация и даны рекомендации по применению в зависимости от типа, судна, его машинной установки и заводских условий.

В своей основной части работа посвящена разработанным автором способам испытания судовой силовой установки на швартовах с подводом воздуха к гребному винту и с применением дискового разгрузочного устройства.

1. СПОСОБЫ РАЗГРУЗКИ ГРЕБНОГО ВИНТА, РАБОТАЮЩЕГО В ШВАРТОВНОМ РЕЖИМЕ

Для создания в процессе швартовных испытаний условий работы главного двигателя, соответствующих ходовым режимам, по предложению доктора техн. наук проф. Попова В. Ф. и Зеленко Т. В., начиная с 1949 года стал применяться гидротормоз-аппарат, представляющий собой крылатку центробежного насоса, насаживаемую на конус гребного вала вместо гребного винта. Этот способ получил применение при испытании судов на стапеле и судов, у которых демонтаж винта и насадка гидротормоза с последующей заменой его винтом не требует специального докования судна. В 1952 году доктор техн. наук Перник А. Д. предложил подводить воздух к гребному винту. Сущность этого предложения заключается в том, что воздух, подводимый к гребному винту, работающему в швартовном режиме, попадая в область пониженного давления, на засасывающей стороне лопасти расширяется, благодаря этому часть подъемной силы, развиваемая засасывающей стороной лопасти, исключается, и гребной винт при определенном соотношении числа оборотов и количества подводимого воздуха становится «легче», винт разгружается. Обтекание лопасти потоком воды при этом имеет отрывной характер. Метод проведения швартовных испытаний с подводом воздуха к гребному винту был разработан под руководством и при непосредственном участии автора данной работы, на которую выдано удостоверение о регистрации № 6438 от 29/IV 1957 г. В результате модельных и натурных испытаний были получены формулы, устанавливающие зависимость между количеством воздуха, подводимого к гребному винту, его геометрическими элементами и параметрами работы. При проведении испытаний по данному методу воздух берется из заводской воздушной магистрали. Оснастка для проведения этих испытаний состоит из трубопровода и воздухораспределительного устройства, подводящего воздух к гребному винту.

Воздухораспределительное устройство состоит из труб, согнутых в кольцо, с просверленными в них отверстиями для выпуска воздуха. Эти трубы крепятся к стяжной ленте, охватывающей мор-

тиру гребного вала, лента стягивается толрепом. Устройство дополнительно закрепляется к корпусу оттяжками.

1958 г. Бормотовым И. И. было предложено кольцевое разгрузочное устройство, действие которого состоит в уменьшении количества воды, протекающей через диск гребного винта. Это достигается тем, что на концах лопастей укрепляется кольцо, закрывающее некоторую часть их действующей поверхности. Кольцо герметизировано и имеет вырезы, в которые заходят концы лопастей. Крепится кольцо на лопастях посредством клиньев с натяжными болтами, устанавливаемыми в пазах. Отсеки кольца, образованные вырезами, соединены между собой сверлениями для равномерного распределения воды в случае ее проникновения через неплотности.

Однако и этот способ не удовлетворил всем требованиям испытаний судов, так как при кольцевой наделке снижение момента и упора происходит примерно в равной степени.

Для судов с механической установкой большой мощности свыше 10 тыс. л. с. является затруднительным воспринять упор, развиваемый гребным винтом. В этом случае возникает необходимость в раздельном воздействии на момент и упор гребного винта, т. е. момент должен быть снижен до величины, равной его значению на ходу, а упор должен быть снижен значительно больше, чем на ходу, практически до величины не более 50—60 т.

Эта задача была решена предложением автора настоящей работы о применении дискового разгрузочного устройства (авторское свидетельство № 135778 от 22/VI 1961 г.).

Этот способ состоит в том, что на гребной винт с засасывающей стороны устанавливается диск, прикрывающий винт от ступицы до некоторого радиуса, определяемого из условия получения заданных упора и вращающего момента. Диск крепится к винту посредством тяг, охватывающих лопасти. В таком виде гребной винт представляет собой комбинацию центробежного насоса (в части, прикрытой диском) и собственно гребного винта (в части, свободной от диска). При вращении гребного винта, вода, заключенная в объемах, образованных лопастями и участками диска между ними, под действием центробежных сил отбрасывается радиально, благодаря чему в этих объемах создаются области пониженных давлений, обеспечивающих возникновение силы, направленной противоположно развиваемому винтом упору. Части лопастей, не прикрытые диском, работают как лопасти гребного винта, но поток в них имеет не осевое направление, а под некоторым углом к оси винта, вследствие взаимодействия с потоками, отбрасываемыми из центральной части, прикрытой диском.

При работе с диском гребной винт значительно разгружается по упору, но крутящий момент при этом возрастает, поэтому применение этого способа возможно в сочетании с частичным погружением винта.

Этот способ был применен и в настоящее время применяется при испытании танкеров типа «Пекин» и сухогрузных судов типа «Ленинский Комсомол».

И, наконец, при испытаниях главных двигателей на швартовах с мощностью до 10 тыс. л. с., когда упор достигает не более 50—60 т, на судах, допускающих значительное изменение осадки (транспортные суда водоизмещением 10—15 тыс. т), может быть использовано свойство разгрузки гребного винта при его частичном погружении. Приближенный метод определения свойств частично погруженного гребного винта, работающего в швартовном режиме, разработан автором данной работы.

Могут быть применены и другие способы, например, на судах с ВРШ ходовой режим на швартовах может быть осуществлен поворотом лопастей.

При крупносерийной постройке небольших судов может быть спроектирован специальный винт или могут быть обрезаны лопасти винта по наружному диаметру.

II. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИМЕНИМОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ РАЗГРУЗКИ ГРЕБНОГО ВИНТА ПРИ РАБОТЕ НА ШВАРТОВАХ

Описанные в первой главе разгрузочные устройства можно разделить на два основных типа: регулируемые — допускающие изменение соотношения мощности и числа оборотов в широких пределах в соответствии с характеристиками работы гребного винта от швартовного до ходового режима и нерегулируемые — воспроизводящие с известным приближением лишь одну ходовую характеристику гребного винта.

К первым относятся подвод воздуха к гребному винту, а также способ частичного погружения гребного винта в комбинации с диском или без него.

Применение этих способов дает возможность проводить швартовные испытания судов в соответствии с различными режимами их плавания к этим судам, относятся буксиры при ходе с «возом» или без него, рыболовецкие траулеры в режиме траления или свободного хода, грузовые суда при ходе «в грузу» или балласте и, наконец, суда на подводных крыльях в положении на киле или на крыльях.

Остальные способы — гидротормоз, кольцевое и дисковое разгрузочные устройства, ввиду отсутствия возможности регулировать потребляемую винтом мощность, позволяют испытывать судно лишь в одном состоянии его нагрузки.

Решению вопроса о применении метода испытаний главных двигателей с использованием разгрузочных устройств должен предшествовать анализ возможности и необходимости проведения таких испытаний.

Вопрос о целесообразности проведения таких испытаний решается на основании следующих факторов:

а) Качества выполненных монтажных работ, характеризующихся количеством дефектов, а следовательно, и количеством часов работы, затрачиваемых на их устранение в процессе ходовых испытаний.

б) Объема серии выпускаемых судов. При большой серии выпускаемых судов небольшая экономия, полученная на сокращении длительности ходовых испытаний одного судна, приведет к значительной годовой экономии.

в) Продолжительности ходовых испытаний или объема испытаний механической установки в общем комплексе испытаний судна.

Если в процессе ходовых испытаний значительная доля времени затрачивается на наладочные работы по главным двигателям и проведение режимных ходов, а испытания остального оборудования судна составляют незначительный объем в общем комплексе испытаний, то целесообразно проводить испытания механической установки на швартовах с применением разгрузочных устройств гребного винта.

г) Сезонности проведения испытаний при большой серийности постройки судов.

Постройка судов большой серией происходит при строгом соблюдении ритма их выпуска. Вынужденный перерыв в проведении испытаний в течение зимнего ледостава приводит к тому, что к весне создается большой задел судов, требующих проведения ходовых испытаний, и сдача их с наступлением навигации растягивается на длительное время, с отрывом большого количества рабочих от работ по достройке и сдаче поточно следующих судов. В этих условиях целесообразно применить метод испытаний с разгрузочным устройством гребного винта.

Определив производственную целесообразность в проведении швартовых испытаний с применением разгрузочных устройств, необходимо установить возможность проведения этих испытаний, исходя из типа машинной установки.

В этом направлении следует учитывать следующие факторы:

а) Возможность развить полную мощность при неподвижном судне. Имеется в виду, что главная механическая установка может быть оборудована вспомогательными механизмами или аппаратами, работа которых на полную производительность может быть обеспечена только при ходе судна. Так, на судах с паротурбинной установкой могут быть применены главные конденсаторы с самопроточной циркуляцией, на судах с дизельными установками самопроток может быть применен на главных маслоохладителях.

б) Тип машинной установки, степень ее сложности, наличие систем автоматического регулирования и других особенностей, влияющих на объем необходимых работ по регулировке и отработке взаимодействия между отдельными частями главной силовой установки при работе на спецификационных режимах. К этому же

относится необходимость в технологической отработке отдельных конструкций, как например, приработка зубьев шестерен главного редуктора на всех ходовых режимах в течение длительного времени.

Рассмотрев типы разгрузочных устройств, их различие по способности воспроизводить те или иные характеристики гребных винтов, целесообразность и возможность их применения в зависимости от производственных условий завода и типа машинной установки, необходимо оценить достоинства и недостатки каждого из способов разгрузки гребного винта и применимость их на судах различных типов.

1. Гидротормоз. По техническим данным гидротормоз может быть применен на судах всех типов и назначений, кроме тех случаев, когда требуется воспроизведение нескольких характеристик гребных винтов. Затруднением в его применении является необходимость производить съемку и постановку гребного винта и гидротормоза.

Гидротормоз следует применять в тех случаях, когда его постановка и съемка осуществляются с наименьшими затратами, а именно, если для этой цели вместо докования можно обойтись подъемом кормы судна краном, дефферентовкой или подъемом судна на набережную.

Гидротормоз может быть применен также при испытании главных двигателей до спуска судна на воду в условиях цеха. Для этой цели гидротормоз помещается в бак, устанавливаемый за кормой на стапельной дорожке, а приводной вал гидротормоза соединяется с гребным валом. Гидротормоз является единственным средством при проведении швартовых испытаний с кавитирующими гребными винтами.

2. Подвод воздуха к гребному винту. Этот способ является универсальным по возможностям воспроизведения различных характеристик гребного винта, однако большие расходы воздуха накладывают известные ограничения в его применении на судах с большой мощностью (свыше 4 тыс. л. с.). Для возможности распространить этот способ на суда с большей мощностью рекомендуется применение воздухо-воздушных эжекторов, использующих избыточный, против требуемого, напор воздуха в заводской воздушной сети для дополнительного подсоса воздуха из атмосферы.

Применение эжектора может быть эффективным при противодавлении не более $0,5-0,6 \text{ кг/см}^2$, коэффициент эжекции при этом может быть достигнут равным единице, т. е. вдвое увеличить количество воздуха, подводимого к гребному винту. Для повышения коэффициента эжекции в тех случаях, когда большой расход воздуха приводит к падению давления в заводской сети, можно рекомендовать подогрев рабочего воздуха, что компенсирует падение давления за счет увеличения перепада тепла в сопле эжектора.

Этот подогрев легко осуществить, используя камеру горения, применяемую в газовых турбинах.

3. Кольцевое разгрузочное устройство. Кольцевое разгрузочное устройство рекомендуется применять для судов с однозначной винтовой характеристикой, если при этом имеются ограничения по расходу воздуха, подводимого к гребному винту.

Применение кольцевого разгрузочного устройства на судах с большой мощностью главных двигателей ограничивается величиной упора, допустимого швартовными средствами судна и причальными сооружениями.

4. Дисковое разгрузочное устройство. Дисковое разгрузочное устройство применяется в комбинации с частичным погружением гребного винта при испытании судов с главными двигателями большой мощности (более 10 тыс. л. с.). Этот тип разгрузочного устройства дает возможность разгрузить гребной винт по упору до любой заданной величины, но при этом нагрузка по моменту возрастает, поэтому уменьшение последнего до требуемой величины производится частичным погружением гребного винта.

5. Полупогружение гребных винтов. Испытания с винтами, выходящими на поверхность воды или работающими вблизи нее, целесообразно применять во всех случаях, когда соответствующую осадку можно достичь балластировкой судна.

В представленной работе впервые дается способ определения осадки судна, при которой гребной винт на швартовах будет работать в ходовом режиме. Применение этого способа целесообразно в тех случаях, когда упор гребного винта не может быть воспринят швартовными средствами судна и причальными сооружениями заводской набережной.

III. РАСЧЕТ РАЗГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

Из перечисленных выше способов проведения швартовных испытаний на спецификационных режимах работы главных двигателей опубликован только способ расчета гидротормоза.

Методы расчета остальных устройств, обеспечивающих работу главных двигателей на швартовах в ходовых режимах, впервые систематизируются, а некоторые из них излагаются в представленной диссертационной работе.

Не останавливаясь на методике расчета гидротормоза, достаточно полно изложенной в опубликованной литературе, ниже приведены методы расчета разгрузочных устройств с подводом воздуха к гребным винтам, кольцевого и дискового разгрузочного устройства, а также метод определения величины осадки судна для испытаний с винтами, частично погруженными или работающими вблизи свободной поверхности воды.

1. Определение количества воздуха, подводимого к гребному винту

Испытание главной судовой силовой установки на швартовах с подводом воздуха к гребному винту требует прежде всего определения необходимого количества воздуха, обеспечивающего получение заданных параметров работы главных двигателей.

В результате модельных испытаний было установлено, что критерием подобия для винтов, работающих в водовоздушной смеси, является безразмерный расход воздуха, определяемый выражением

$$\bar{Q} = \frac{Q}{nD^3} \quad (1)$$

Количество воздуха в зависимости от геометрических элементов и числа оборотов гребного винта, выражается формулой

$$Q = 0,16 nD^3 (A/Ad + H/D), \text{ м}^3/\text{сек}. \quad (2)$$

Эта формула действительна для винтов, у которых отношение коэффициентов моментов K_2 на швартовах и на ходу не превосходит двух. При величине этого отношения более двух следует пользоваться формулой

$$Q = 0,04 nD^3 (A/Ad + H/d), \text{ м}^3/\text{сек}. \quad (3)$$

Эти формулы справедливы в пределах изменения A/Ad от 0,35 до 1,0
 H/D от 0,7 до 1,5.

Указанные пределы A/Ad и H/D охватывают в основном все практически встречающиеся типы винтов.

В приведенных формулах приняты обозначения:

$\bar{Q}$ — безразмерный расход воздуха,

Q — объемный расход воздуха при давлении на уровне оси винта, $\text{м}^3/\text{сек}$;

D — диаметр гребного винта, м ;

n — число оборотов гребного винта, $\text{об}/\text{сек}$;

A/Ad — дисковое отношение;

H/D — шаговое отношение.

Для обеспечения нормальной работы воздухоподводящего устройства необходимо выполнить гидравлический расчет системы, обеспечивающей подвод воздуха к гребному винту. Этот расчет должен удовлетворять условиям равномерного распределения воздуха по диску гребного винта при минимальном сечении воздухопроводов и минимальных гидравлических сопротивлениях в них, позволяющих использовать воздух из заводской воздушной сети.

Особенности гидравлического расчета изучены недостаточно, что потребовало проведения специальных исследований.

К этим особенностям относятся:

а) течение воздуха в трубе с отверстиями вдоль линии потока при переменном противодавлении, обусловленном различной глубиной погружения отверстий;

б) отсутствие данных по коэффициенту истечения воздуха под уровень жидкости из отверстий при боковом истечении и различных перепадах давлений в них;

в) значительный расход воздуха, приводящий к необходимости в ряде случаев прибегать к применению воздуховоздушных эжекторов. Использование эжекторов ставит требование минимального противодавления, а следовательно, и проектирования воздухоподводящей системы с минимальными потерями. Отсутствие прототипов эжекторов при используемых параметрах воздуха привело к необходимости установить экспериментально оптимальные величины их геометрических соотношений, не определяемых тепловым расчетом.

Кроме того, практика проведения испытаний с подводом воздуха к гребному винту привела к необходимости решения следующих вопросов:

а) подводное обмерзание отверстий при истечении из них воздуха с температурой ниже нуля;

б) минимальная осадка судна при проведении испытаний;

в) определение режима работы силовой установки на швартовах.

Решение этих вопросов рассматривается в следующей главе.

2. Расчет кольцевого разгрузочного устройства

Расчет кольцевого разгрузочного устройства состоит из определения внутреннего диаметра кольца, определения потерь на трение кольца о воду, определения напряжений, возникающих в кольце под действием центробежных сил.

Внутренний диаметр кольцевого разгрузочного устройства определяется, исходя из равенства крутящих моментов и числа оборотов на швартовах и на ходу.

Приравнявая выражения для крутящих моментов на швартовах и на ходу, будем иметь:

$$D_k = D_v \sqrt[5]{\frac{K_{2x}}{K_{2шв}}} \quad (4)$$

Но ввиду того, что K_2 с уменьшением диаметра изменяется, расчет ведется последовательными приближениями. Для этого следует ориентировочно принять внутренний диаметр кольца D_k на 10—15% меньше диаметра винта D_v , затем вычислить шаговое отношение для измененного диаметра H/D_k , по которому по кривым действия винта той же серии определить новое значение $K_{2шв}$.

Подставив его в формулу (4), можно определить новое значение D_k . Обычно 2—3 последовательных приближений достаточно, чтобы получить сходимость в пределах 2—3%.

Сила трения при движении пластины для чисел Рейнольдса, лежащих в пределах от $Re = 10^6$ до $Re = 10^9$, определяется выражением Прандтля-Шлихтинга

$$R_{mo} = \epsilon f \omega \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

где

ϵf — коэффициент трения;

ω — смоченная поверхность, m^2 ;

ρ — массовая плотность воды, $\frac{кг \cdot сек}{м^4}$

v — средняя окружная скорость кольца, $м/сек$.

Коэффициент трения зависит от режима обтекания пластины жидкостью

$$\epsilon f = 0,455 (lg Re)^{-2,58} \quad (6)$$

Число Рейнольдса в данном случае имеет вид:

$$Re = \frac{vl}{\nu}$$

где l — длина пластины (для кольца это будет длина окружности по среднему радиусу);

ν — коэффициент кинематической вязкости ($\nu = 1,158 \cdot 10^{-6}$)

Момент трения кольца о воду:

$$M_{тр} = R_{тр} \cdot r_{ср}, \quad (7)$$

где $r_{ср}$ — средний радиус кольца.

С учетом сил трения кольца о воду новое значение внутреннего диаметра кольца D'_k определится из выражения

$$M_{шв} = M'_{шв} + M_{тр}$$

Выражая моменты через их значения для гребного винта, получим:

$$K_{2шв} \rho n^2 D_k^5 = K'_{2шв} \rho n^2 (D'_k)^5 + M_{тр}, \quad (8)$$

откуда

$$D'_k = \sqrt[5]{\frac{K_{2шв}}{K'_{2шв}} \cdot D_k^5 - \frac{M_{тр}}{\rho n^2 K'_{2шв}}} \quad (9)$$

Здесь

- $K_{2шв}$ — первоначально вычисленное значение коэффициента момента;
 D_k — первоначально вычисленное значение внутреннего диаметра кольца;
 $K'_{2шв}$ — новое значение коэффициента момента;
 D'_k — новое значение внутреннего диаметра кольца.

Это уравнение также решается последовательными приближениями.

Данный метод является приближенным, так как не учитывается дополнительное облегчение винта, связанное с уменьшением концевых потерь, увеличением скорости воды, протекающей через диск винта, а также не учитывается влияние корпуса. Поэтому полученный расчетом диаметр кольца следует несколько увеличить с тем, чтобы по результатам испытаний можно было его откорректировать путем наращивания боковых стенок кольца по направлению к оси винта. После этого необходимо выполнить расчеты: кольца на прочность под действием центробежных сил, валопровода, подшипников и дейдвудную втулку под действием дополнительных нагрузок.

3. Расчет дискового разгрузочного устройства

Работа винта вблизи свободной поверхности или при частичном его погружении зависит от ряда факторов (изменение действующей площади диска винта, засасывание воздуха из атмосферы, затрата энергии на волнообразование, нестационарность потока, обтекающего лопасть при попеременном пересечении свободной поверхности и т. д.), всесторонний учет которых является весьма сложной теоретической проблемой, наличие же диска еще более усложняет решение этого вопроса. Поэтому для приближенной оценки гидродинамических характеристик винта, работающего в этих условиях, целесообразно воспользоваться данными модельных испытаний. Такие испытания были проведены с моделью гребного винта танкера типа «Пекин». Испытания проводились с дисками

ных диаметров $d = \frac{D_d}{D_v} = 0,5; 0,7$ и $0,9$ при различном относительном углублении винта $\tau = \frac{h}{R_v}$, равном $0; 0,15; 0,6; 1,0; 3,4$.

Здесь приняты обозначения:

- D_d — наружный диаметр диска;
 D_v — диаметр винта;
 h — расстояние оси винта до поверхности воды;
 R_v — радиус винта.

Данные этих испытаний сведены в графики, по которым при заданных упоре и моменте на гребном винте можно определить

необходимые осадку и диаметр диска, прикрывающего гребной винт.

Аппроксимация семейства кривых, построенных по данным испытаний, выражается формулами:

для определения упора $\frac{K_{1ход}}{K_{1шв}} = 52 \left(1 - \frac{D_d}{D_v}\right) \frac{H}{D_v},$ (10)

для определения момента $\frac{K_{2ход}}{K_{2шв}} = 80 \left(\frac{H}{D_v}\right)^{2,2},$ (11)

где

- $K_{1ход}, K_{2ход}$ — заданные коэффициенты упора и момента;
 $K_{1шв}, K_{2шв}$ — коэффициенты упора и момента винта при работе в швартовном режиме при полном углублении;
 D_d — диаметр диска;
 D_v — диаметр винта;
 H — углубление винта, считая от нижней кромки лопасти.

Выражение для упора составлено применительно к относительному диаметру диска в пределах $(0,7—0,9)$.

4. Метод определения осадки судна при испытании с полупогруженными винтами

Исследование работы полупогруженных винтов, основанное на данных испытаний их моделей, было произведено Кемпфом в 1934 г. Это исследование было выполнено в широком диапазоне скольжений при различном погружении оси гребного винта. Теоретическое исследование работы винта вблизи свободной поверхности подробно освещено в работе А. М. Басина, В. М. Лаврентьев, используя данные испытаний Кемпфа, дает некоторые практические указания по определению в ходовых условиях гидродинамических характеристик винтов при их частичном погружении.

Используя данные модельных испытаний Кемпфа, рекомендации В. М. Лаврентьева и специально проведенные испытания модели винта танкера «Пекин», разработан удобный для практического использования график, дающий возможность определить необходимые условия работы винта в швартовном режиме, чтобы получить заданный ходовой режим работ главного двигателя. По полученной из графика величине углубления можно в первом приближении судить о возможности применения этого способа испытания для данного судна, исходя из допустимых пределов изменений его осадки, или о заведомой невозможности воспользоваться этим методом испытаний.

Уточнение осадки для подбора мощности при соответствующих числах оборотов можно произвести затем в процессе испытаний.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Изменение давления в трубе при переменном расходе воздуха вдоль нее

Для достижения эффекта разгрузки винта при минимальном расходе воздуха весьма важно, чтобы воздух равномерно попадал на всю площадь диска винта. Это может быть достигнуто лишь в том случае, если истечение воздуха из всех отверстий будет происходить при одинаковых перепадах в них давлений, т. е. разность давлений в трубе и за трубой для каждого отверстия будет одинаковой. Сложность условий, обеспечивающих равенство расходов воздуха из всех отверстий, заключается в том, что:

а) давление за трубой переменное; оно возрастает с глубиной погружения отверстий;

б) давление в трубе может повышаться и понижаться в зависимости от режима течения воздуха по ней.

Экспериментом было проверено явление повышения давления вдоль трубы при боковом истечении воздуха из нее и получен суммарный коэффициент трения, отвечающий натурным условиям.

Принимая изменение скорости вдоль трубы при боковом истечении воздуха из нее убывающей по линейному закону (что было подтверждено экспериментом) и используя уравнение Бернулли, получено выражение для необходимой скорости воздуха C в месте подвода к воздухораспределительному кольцу для преодоления заданного гидростатического давления Δh

$$C_1^2 = \frac{2g\Delta h\gamma_w}{\gamma_1\left(1 - \frac{1}{3}\frac{\lambda L}{d}\right)}. \quad (12)$$

В этом выражении:

C_1 — скорость воздуха при входе в воздухораспределительное кольцо;

Δh — расстояние от места присоединения воздухоподводящей трубы до нижнего отверстия;

γ_w — удельный вес воды;

γ_1 — удельный вес воздуха при входе в воздухораспределительное кольцо;

λ — коэффициент трения по воздухораспределительному кольцу;

L — длина части воздухораспределительного кольца от места присоединения воздухоподводящей трубы до нижнего отверстия;

d — диаметр сечения воздухораспределительного кольца.

Коэффициент трения получен экспериментально, величина его зависит от режима течения воздуха по кольцу, причем для скоростей воздуха, имеющих место при испытаниях порядка 100—150 м/сек величина его мало отличается от обычно принимаемой при расчетах трубопроводов и составляет 0,01—0,012.

2. Определение коэффициента расхода отверстий при боковом истечении из них воздуха

Для обеспечения равномерного поступления воздуха по всему диску гребного винта необходимо соблюсти определенное изменение давления как по длине воздухораспределительного кольца, так и поддержание определенного перепада давлений в отверстиях. Если первое условие обеспечивается необходимой скоростью воздуха в начале воздухораспределительного кольца, то второе условие требует назначения определенного количества отверстий, обеспечивающего поддержание заданного давления в трубе и требуемого расхода воздуха. Для определения количества отверстий необходимо знать расход воздуха через них, который кроме давлений перед и за отверстием определяется также и коэффициентом расхода μ .

Значение коэффициента расхода μ для специфических условий бокового истечения воздуха из отверстий под уровень жидкости при различных начальных давлениях воздуха и различных перепадах давления в них было получено экспериментальным путем.

Изменение коэффициента расхода отверстий μ в зависимости от величины диаметра и отношения давлений представлено таблицей.

Отношение давлений, $\frac{P_2}{P_1}$	Диаметр отверстий, мм					
	3	4	5	6	7	8
0,4	0,85	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93
0,5	0,74	0,86	0,89	0,89	0,89	0,89
0,6	0,64	0,73	0,84	0,84	0,85	0,85
0,7	0,52	0,72	0,79	0,80	0,82	0,82
0,8	0,4	0,66	0,74	0,77	0,78	0,78
0,9	0,2	0,6	0,7	0,73	0,74	0,74

3. Обмерзание отверстий

Обмерзание отверстий под уровнем воды при истечении из них воздуха с температурой -24°C было обнаружено при проведении испытаний с подводом воздуха к винту в зимних условиях.

В результате выполненной работы по подводному обмерзанию отверстий составлены следующие выводы и рекомендации:

а) обмерзание отверстий возникает только при температуре воздуха ниже -20°C ;

б) обмерзанию подвергаются только внутренние стенки отверстий и район трубы в непосредственной близости к отверстиям, наружная поверхность трубы при течении в ней холодного воздуха остается свободной ото льда;

в) для проведения испытаний в зимнее время необходимо теплоизолировать трубу, а холодный воздух перед началом испытаний стравить из трубопровода в атмосферу;

г) отверстия в воздухораспределительном кольце следует раззенковывать для того, чтобы обеспечить подток воды к наружным краям отверстий и улучшить подвод к ним тепла от забортной воды;

д) для предотвращения замерзания воды в воздухоподводящем трубопроводе на уровне ватерлинии рекомендуется поддерживать избыточное давление в нем, равное столбу воды над верхним отверстием, или заливать в трубопровод незамерзающую жидкость (мазут, соляр, отработанное машинное масло) в объеме, несколько превышающем толщину льда.

4. Применение эжектора для обеспечения испытаний добавочным количеством воздуха, засасываемого из атмосферы

При испытании судов с подводом воздуха к гребному винту в ряде случаев возникает затруднение в получении необходимого количества воздуха, что ограничивает область применения данного метода испытаний.

Снижение расхода сжатого воздуха может быть достигнуто за счет подсоса некоторого количества воздуха из атмосферы, для чего может быть применен воздуховоздушный эжектор.

В результате анализа ряда литературных источников по эжекторам рекомендуется принимать следующие опытные коэффициенты:

$\eta_1 = 0,95$ — к.п.д. сопла,

$\eta_2 = 0,85$ — к.п.д. камеры смешения,

$\eta_3 = 0,75$ — к.п.д. диффузора.

Результаты проведенных работ дали возможность рекомендовать следующие опытные величины: расстояние от среза сопла до горловины в пределах 3—4 диаметров минимального сечения сопла; длина горловины эжектора 2—3 ее диаметра.

Площадь минимального сечения сопла принимать на 10% больше расчетного значения для обеспечения необходимого запаса на случай понижения давления в сети и для компенсации неточностей в расчете.

Площадь горловины эжектора следует принимать на 15—20% больше расчетной.

При больших расходах воздуха, приводящих к падению давления в сети до 3—4 ата, целесообразно применять подогрев рабочего воздуха при условии, что противодействие не превышает 1,5—1,7 ата. Коэффициент эжекции при этом может быть сохранен

тем же, что и при давлении 5—6 ата с эжектором без подогрева. Затраты, связанные с подогревом воздуха, компенсируются экономией, полученной от сокращения расхода воздуха из сети. Для подогрева воздуха используется камера горения, применяемая в газотурбинных установках.

5. Определение режима работы главного двигателя и минимальная осадка судна при проведении испытаний

Качество проведения швартовых испытаний с использованием разгрузочных устройств гребного винта определяется тем, насколько точно режим работы главного двигателя на швартовах будет соответствовать его режиму работы на ходу судна. Иначе говоря, приступая к швартовым испытаниям, необходимо заранее знать, каковы будут мощность и число оборотов двигателя на ходу.

В результате анализа данных по ходовым испытаниям судов различных проектов установлено, что отклонение в мощности, развиваемой двигателем, составляет 7—8%, а регулировочные данные двигателей сохраняются в допустимых пределах при изменении мощности двигателей в пределах 10%. Таким образом, задавая на швартовах мощность по среднесерийным ее значениям, при соответствующих оборотах, можно выполнить регулировку главных двигателей внутреннего сгорания с гарантией, что на ходовых испытаниях регулировочные данные будут сохранены.

Осадку судна при испытаниях с полностью погруженным винтом должна быть такой, чтобы отношение глубины погружения оси гребного винта к его радиусу было не менее 1,7. При меньших значениях этой величины происходит подсос воздуха из атмосферы с самопроизвольной разгрузкой гребного винта до величины, значительно большей, чем это требуется для ходового режима.

V. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОЗДУХОПОДВОДЯЩЕГО УСТРОЙСТВА

При проектировании системы подвода воздуха к гребному винту возможны два принципиально различных случая. Первый случай имеет место, если испытываемое судно небольшое и расход воздуха невелик по сравнению с производительностью заводских компрессоров. Диаметр береговых трубопроводов при этом достаточен для пропуска необходимого количества воздуха без значительного падения давления.

Второй случай характеризуется тем, что большой расход воздуха приводит к падению давления в береговом трубопроводе, а для обеспечения равномерного распределения воздуха по диску гребного винта требуется создать определенную скорость движения воздуха в воздухораспределительном кольце, на получение ко-

торой используется определенный перепад давления, и без того ограниченный вследствие потерь в трубопроводах.

Как в первом, так и во втором вариантах расчета требуется обеспечить равномерный расход воздуха по диску гребного винта, т. е. необходимо, чтобы объемный расход воздуха через все отверстия был одинаков.

При расчете по первому варианту это достигается благодаря тому, что давление в трубе перед каждым отверстием P_3 принимается равным или большим $0,528 P'_3$ давления за отверстием, т. е. истечение происходит при критическом перепаде давлений.

Давление в месте присоединения воздухоподводящей трубы к воздухораспределительному кольцу P_2 определяется из расчета воздухоподводящего трубопровода. При этом необходимо соблюсти условие

$$\frac{P_2^1}{P_2} \leq 0,528.$$

Давление перед нижним отверстием определяется из равенства отношений давлений перед и за отверстиями во входном и конечном сечении воздухораспределительного кольца

$$\frac{p_a + \gamma H}{p^2} = \frac{p_a + \gamma(H + \Delta h)}{p_3} = \text{const}, \quad (13)$$

откуда

$$p_3 = p_2 \frac{p_a + \gamma(H + \Delta h)}{p_a + \gamma H}.$$

Требуемое давление перед нижним отверстием может быть получено при вполне определенном значении скорости во входном сечении воздухораспределительного кольца, величина которой определяется выражением

$$C_2^2 = \frac{\frac{k}{k-1} 2g(p_3 v_3 - p_2 v_2)}{\left(1 - \frac{1}{3} \frac{\lambda L}{d}\right)} \quad (14)$$

и вычисляется по полученным значениям p_3 и p_2 .

Здесь v_3 — удельный объем воздуха перед нижним отверстием,

$$v_3 = \frac{RT}{p_3},$$

где

R — газовая постоянная для воздуха, равная 29,27;

T — температура воздуха принимается равной 288° К;

v_2 — удельный объем воздуха перед отверстием в месте присоединения воздухоподводящей трубы, $v_2 = \frac{RT}{p_2}$;

λ — коэффициент сопротивления воздухораспределительного кольца $\lambda = 0,012$;

L — длина воздухораспределительного кольца на участке $p_2 - p_3$.

Скорость C_2 в формуле (14) обеспечивается подбором соответствующего диаметра воздухораспределительного кольца, которым следует предварительно задаться (в пределах 50—70 мм). После того, как скорость C_2 определена в первом приближении, необходимо проверить правильность принятого диаметра d по уравнению сплошности:

$$d = \sqrt{\frac{F v_2}{0,785 C_2}}. \quad (15)$$

Здесь приняты обозначения:

$p_1 v_1$ — давление и удельный объем в начале воздухоподводящей трубы;

$p_2 v_2$ — давление и удельный объем в месте подвода воздуха к воздухораспределительному кольцу;

$p_3 v_3$ — давление и удельный объем на уровне нижнего отверстия;

H — расстояние от поверхности воды до места подвода воздуха к воздухораспределительному кольцу;

Δh — расстояние от места подвода воздуха к воздухораспределительному кольцу до нижнего отверстия;

L — длина воздухораспределительного кольца на участке $p_2 - p_3$;

C_2 — скорость воздуха при входе в воздухораспределительное кольцо;

d — диаметр воздухораспределительного кольца;

p_a — атмосферное давление;

γ — удельный вес воды;

G — весовой расход воздуха.

При значительном расхождении диаметров принятого и полученного по формуле (15) необходимо в формулу (14) подставить полученный из (15).

Расчет по второму варианту производится исходя из минимальных потерь давления в воздухоподводящих трубопроводах, потерь давления с выходной скоростью и в отверстиях. В результате расчета необходимо подобрать такие диаметры трубопроводов, чтобы давление при входе в воздухоподводящий трубопровод было минимальным или, во всяком случае, не превосходило располагаемого давления в заводском воздухопроводе.

Необходимое давление в начале воздухоподводящего трубопровода равно:

$$P_1 = \Delta P_{\text{подв}} + \Delta P_{\text{распр}} - \Delta P_{\text{восст}} + \Delta P_{\text{отв}} + P'_3, \quad (16)$$

где:

$\Delta P_{\text{подв}}$ — гидравлические потери в воздухоподводящей трубе на участке между местом подключения к заводскому воздухопроводу и местом ее присоединения к воздухораспределительному кольцу, кг/м^2 ;

$\Delta P_{\text{распр}}$ — гидравлические потери по длине воздухораспределительного кольца от места присоединения воздухоподводящей трубы до нижнего отверстия;

$\Delta P_{\text{восст}}$ — теоретическое приращение давления по длине воздухораспределительного кольца (без учета трения) от места присоединения воздухоподводящей трубы до нижнего отверстия;

$\Delta P_{\text{отв}}$ — падение давления в отверстии;

P'_3 — давление за нижним отверстием;

$$P'_3 = Pa + \gamma(H + \Delta h) - \Delta P_{\text{эж}}; \quad (17)$$

$\Delta P_{\text{эж}}$ — снижение давления за отверстием вследствие эжектирующего действия потока воды, обтекающего воздухораспределительную трубу.

Определим составляющие, входящие в формулу (16). Расчет ведется, начиная с выходного отверстия, давление за которым равно

$$P'_3 = P_0 - \frac{C_0^2}{2g} \gamma = P_0 - \Delta P_{\text{эж}},$$

где:

P_0 — давление в набегающем потоке на большом удалении от воздухораспределительной трубы;

γ — удельный вес воды;

C_0 — скорость набегающего потока,

$$C_0 = \sqrt{\frac{T}{2\rho F}}, \quad (17)$$

где:

T — упор гребного винта (значение его берется из диаграмм — кривых действия винта);

ρ — массовая плотность воды; $\rho = 102$ (для пресной воды);

F — площадь диска гребного винта.

Падение давления в отверстии определяется по формуле:

$$\Delta P_{\text{отв}} = 1,23 \frac{C_{\text{вых}}^2}{2g} \gamma_{\text{вых}}, \quad (18)$$

где:

$C_{\text{вых}}$ — скорость выхода воздуха из отверстия (принимается равной 30—50 м/сек);

$\gamma_{\text{вых}}$ — удельный вес воздуха по выходе из отверстия, принимается при давлении на уровне рассматриваемого отверстия.

Восстановление давления вдоль воздухораспределительной трубы

$$\Delta P_{\text{восст}} = \gamma \Delta h, \quad (19)$$

где:

γ — удельный вес воды;

Δh — разность в углублениях отверстий между p_2 и p_3 .

Заданное повышение давления от p_2 до p_3 может быть получено за счет кинетической энергии воздуха, подводимого к воздухораспределительному кольцу, для чего необходимо создать скорость воздуха, равную

$$C_2^2 = \frac{2g \frac{\Delta P}{\gamma_2}}{1 - \frac{1}{3} \frac{\lambda L}{a}}, \quad (20)$$

где $\Delta p = p_3^1 - p_2^1$,

γ_2 — удельный вес воздуха, определяемый по давлению p_2 .

По этой скорости, как указано было выше, определяется диаметр воздухораспределительного кольца. Давление в воздухораспределительном кольце определяется с учетом предыдущих выражений следующей формулой:

$$P_2 = P_3^1 + \Delta P_{\text{отв}} + \Delta P_{\text{восст}}. \quad (21)$$

Определив давление p_2 , являющееся конечным давлением воздухоподводящей трубы, необходимо подобрать ее диаметр таким образом, чтобы падение давления в ней ограничивалось пределом

$$\Delta P_{\text{подв}} = P_1 - P_2.$$

Для этого воспользуемся формулой, связывающей начальное и конечное давления в трубопроводе

$$P_1 = \frac{P_2}{\sqrt{1 - \frac{\lambda L}{d_{\text{тр}}} \cdot \frac{C_1^2}{gRT}}}, \quad (22)$$

где:

P_1 — давление в начале воздухоподводящего трубопровода. Определяется по данным пропускной способности заводского трубопровода;

L — длина воздухоподводящего трубопровода с учетом местных сопротивлений, выраженных в эквивалентных длинах;

$d_{\text{тр}}$ — диаметр воздухоподводящего трубопровода;
 C_1 — скорость в начале трубы по параметрам при давлении P_2 и при принятом диаметре трубопровода;
 λ — коэффициент трения,

$$\lambda = \frac{0,019}{3 \sqrt{d_{\text{тр}}}}. \quad (23)$$

Поскольку давление P_1 в начале воздухопровода является заданным, исходя из производительности заводской компрессорной установки, потребного расхода воздуха для гребного винта и сопротивлений заводских воздушных магистралей, а давление P_2 было определено указанным выше расчетом, то определение диаметра сводится к подбору такого его значения, которое удовлетворило бы формуле (22).

Расчет количества и диаметра отверстий

Расход воздуха через отверстие при критическом истечении определяется известной из термодинамики формулой:

$$G_{\text{отв}} = 2,15 \mu f \sqrt{\frac{P_1}{v_2}}, \text{ кг/сек}, \quad (24)$$

где:

μ — коэффициент расхода;
 f — площадь отверстия, м;
 P_1 — давление перед отверстием, в нашем случае p_3 , кг/м;
 v_1 — удельный объем перед отверстием, в нашем случае v_3 м³/кг.

При отношениях давлений за и перед отверстием, больших 0,528, но значительно меньших единицы (при которых величина скорости выхода воздуха превышает 100 м/сек), расход воздуха следует определять по формуле

$$G_{\text{отв}} = \mu f \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \frac{P_1}{v_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (25)$$

где p_1 и p_2 — давление перед отверстием и за отверстием.

Расход воздуха через отверстие по второму варианту (при малом перепаде давления, когда скорость меньше 100 м/сек), можно получить, пренебрегая сжимаемостью воздуха по известной из гидравлики формуле

$$G_{\text{отв}} = \mu f \sqrt{2g \Delta P_{\text{отв}} \gamma_3}, \text{ кг/сек}. \quad (26)$$

Коэффициент расхода μ определяется по графикам или берется из таблицы при принятом диаметре отверстий и указанном отношении давлений за и перед отверстием.

Определив расход воздуха через одно отверстие, следует определить число отверстий n :

$$n = \frac{G}{G_{\text{отв}}}. \quad (27)$$

Здесь G — общий расход воздуха.

После этого проверяется размещение отверстий по окружности воздухораспределительного кольца, для чего необходимо знать его диаметр. Диаметр воздухораспределительного кольца D_k следует принимать в зависимости от диаметра гребного винта

$$D = 0,6 D_v, \text{ м}. \quad (28)$$

При большом диаметре винта (более 2 м), целесообразно принимать несколько концентрично расположенных воздухораспределительных колец.

Определив диаметр кольца D_k , следует определить шаг отверстий и возможность размещения отверстий по длине его окружности L

$$L = \pi D_k - S, \text{ м}, \quad (29)$$

где S — вырез в кольце для установки его на мортиру гребного вала.

$$\text{Шаг отверстий } t = \frac{L}{n}.$$

Отверстия целесообразно располагать в 2 ряда так, чтобы их оси располагались по окружности сечения трубы под углом 120° к направлению потока.

Заключение

1. В представленной работе впервые в практике судостроения произведено исследование и обобщение методов испытаний главных судовых силовых установок на швартовах при сочетаниях мощности и числа оборотов в соответствии с ходовыми режимами работы.

2. Рассмотренные новые методы испытаний с применением устройств, имитирующих ходовые режимы, дают возможность проводить швартовые испытания главных двигателей при спецификационных параметрах на судах всех типов и назначений.

3. При выборе метода проведения швартовых испытаний с применением различных способов разгрузки гребного винта следует отдавать предпочтение методам, допускающим возможность изменения сочетания мощности и числа оборотов в широких пределах в процессе самих испытаний, что особенно важно для судов с многозначной винтовой характеристикой (траулеры, тральщики, буксиры, грузовые суда при ходе в грузу и в балласте). Такими методами являются подвод воздуха к гребному винту и изменение

осадки судна, а также комбинации их с другими методами, в частности, с применением кольцевого или дискового разгрузочного устройства.

4. Благодаря возможности осуществления при швартовных испытаниях режимов работы главных двигателей в соответствии с ходовыми условиями, может быть существенно сокращена продолжительность ходовых испытаний судна и общая стоимость испытаний судна. В случае необходимости, ходовые испытания главных двигателей могут быть целиком заменены швартовными испытаниями с применением имитирующих устройств, что особенное значение имеет в военное время.

5. Результаты экспериментальных работ, модельных испытаний гребных винтов, а также испытаний ряда судов, дали возможность разработать методику расчета воздухоподводящих устройств, а также приближенную методику выбора осадки судна при швартовных испытаниях с уменьшенным погружением винта и методику выбора диаметра дискового разгрузочного устройства.

6. Некоторые данные, полученные при экспериментах (по коэффициентам истечения, коэффициенту потери вдоль трубы и подводному обмерзанию отверстий, достижимым коэффициентам эжекции и выбору конструктивных элементов воздуховоздушных эжекторов), а также результаты сделанного в первом приближении теоретического анализа и обобщения этих данных могут быть использованы не только при проведении швартовных испытаний судов с имитацией ходовых режимов работы силовых установок, но и в смежных областях техники, в частности, при сооружении пневматических волноломов, при ограждении доков от заплыва в них льда, при зимнем доковании судов, при поддержании проходимости фарватера в условиях ледостава и т. д.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
I. Способы разгрузки гребного винта, работающего в швартовном режиме	5
II. Классификация и применимость различных способов разгрузки гребного винта при работе на швартовах	7
1. Гидротормоз	9
2. Подвод воздуха к гребному винту	9
3. Кольцевое разгрузочное устройство	10
4. Дисковое разгрузочное устройство	10
5. Полупогружение гребных винтов	10
III. Расчет разгрузочных устройств	10
1. Определение количества воздуха, подводимого к гребному винту	11
2. Расчет кольцевого разгрузочного устройства	12
3. Расчет дискового разгрузочного устройства	14
4. Метод определения осадки судна при испытании с полупогруженными винтами	15
IV. Экспериментальные исследования	16
1. Изменение давления в трубе при переменном расходе воздуха вдоль нее	16
2. Определение коэффициента расхода отверстий при боковом истечении из них воздуха	17
3. Обмерзание отверстий	17
4. Применение эжектора для обеспечения испытаний добавочным количеством воздуха, засасываемого из атмосферы	18
5. Определение режима работы главного двигателя и минимальная осадка судна при проведении испытаний	19
V. Методика расчета воздухоподводящего устройства	19
Заключение	25