

Сергей Дмитренко

# Еще раз о вибрации гребных винтов

В классической судостроительной науке не принято уделять особое внимание вопросам жесткости конструкции гребных винтов. Считается, что жесткость их лопастей на практике высока настолько, что влиянием динамических процессов на их прочность и эффективность работы можно пренебречь. Так ли это? Некоторые факты поломок гребных винтов и связанных с этим аварий находят логичное объяснение, если принять допущение об относительной гибкости их лопастей и возникновении в них вибраций при работе. Конечно, проблема выглядит не слишком актуальной для малотоннажных судов с их относительно небольшими по размеру винтами. Однако надо отметить усилия, которые прилагают ученые и конструкторы для снижения шума и вибраций, возникающих при работе винтов малотоннажных моторных яхт премиум-класса, а также типичные проблемы с воздушными винтами малых СВП – их высокую шумность и невысокий эксплуатационный ресурс. Возможно, предлагаемый к рассмотрению материал поможет разрешить их.

## Неудачи с колесом Грима

Одним из устройств, значительно повышающих экономичность работы

гребного винта, стало так называемое колесо Грима. В 80-е гг. оно широко применялось на коммерческих судах, что давало значительный экономический эффект. Напомним, оно представляет собой свободно вращающийся ротор, устанавливаемый за основным гребным винтом и превосходящий его по диаметру. Лопасти ротора спрофилированы так, что средняя его часть работает как гидротурбина, использующая энергию отбрасываемого винтом потока, а периферийная – как дополнительный гребной винт. Согласно данным японской фирмы «Nakashima Propeller» экономия мощности при использовании колеса Грима на сухогрузном судне вместимостью 199 рег.т, имеющем скорость 12.1 уз, составила 6–8%. Установить такое колесо было очень просто на любое судно с минимальными переделками, по этой причине началось массовое их внедрение на судах различных классов и назначений. Однако дальнейшие события оказались обескураживающими. Двигатели приходили в негодность настолько быстро, что не успевали окупить себя. Затем цены на нефть упали, и от применения этих устройств отказались. Что же произошло с колесами Грима?

Невольно поражает внешнее сходство колес Грима с авиационными пропеллерами. Вот в авиации иногда наблюдается такое вредное явление, как вибрации лопастей винтов. В работе Г.В.Новожилова «Из истории советской авиации. Самолеты ОКБ Ильюшина» сообщается: «В первых полетах (самолета «Ил-12») испытателям много неприятностей доставила тряска новых воздушных винтов, сде-



ланных специально для этого самолета. Тряска возникала из-за недостаточной жесткости лопастей винтов, и потребовалось провести испытания трех вариантов, прежде чем она была устранена». В работе было выведено, что существует некое соотношение между энергией набегающего потока и жесткостью лопасти, при котором появляется вибрация винтов, названная «тряской». Возникают большие подозрения: не является ли причиной преждевременных разрушений колес Грима та самая «тряска лопастей», в результате которой могут возникнуть усталостные явления, приводящие к их преждевременному выходу из строя?

## Возможные причины разрушения колес Грима

Обратимся к отчету Новосибирского института гидродинамики им. М.А.Лаврентьева «Вынужденные колебания лопастей гидротурбин» 1985 г. авторов В.Б. Курзина и Л.Л. Ткачевой. Там сказано: «Особое место (в развитии турбостроения) занимает повышение точности расчетов вибрационной надежности лопастей, поскольку поломки их связаны в основном с усталостными разрушениями вследствие интенсивных вибраций... Наибольшую опасность представляют гидроупругие колебания, вызванные взаимодействием лопастей с набегающим потоком. Колебания можно разделить на два класса: свободные и вынужденные. Первые создают возмущения в основном потоке, которые в определенных условиях могут привести к самовозбуждающейся колебательной неустойчивости (флаттеру) лопастей.

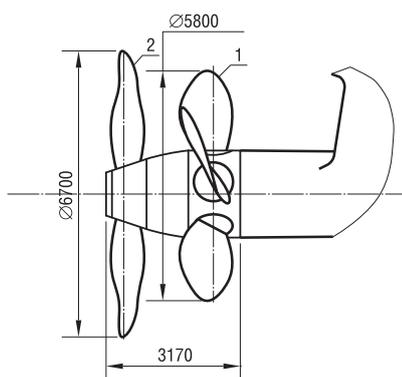


Рис.1. Так устроен двигательный комплекс с колесом Грима: 1 – гребной винт; 2 – колесо Грима

Вынужденные колебания связаны, как правило, с неравномерностью набегающего потока и возникающими при этом периодическими силами. При совпадении частоты внешнего возмущения с частотой собственных колебаний лопастей наступают режимы резонанса. На режимах резонанса и флаттера возникают значительные динамические напряжения, способные приводить к разрушению лопастей».

Итак, усталостные разрушения лопастей могут быть вызваны следующими видами вибрации: флаттер, резонанс и «тряска» (свободные колебания вследствие окружной неравномерности набегающего потока). Рассмотрим их по отдельности.

**Флаттер.** Вот что писал о нем авиаконструктор А.С.Яковлев: «С ростом скорости самолетов авиация столкнулась с неизвестным ранее явлением – флаттером. Этим термином обозначаются самовозбуждающиеся колебания крыла и оперения с быстро нарастающей амплитудой, часто приводящие к разрушению конструкции самолета». Исследования, проведенные ЦАГИ, показали, что одной из причин возникновения автоколебаний является недостаточная жесткость крыла, оперения и фюзеляжа.

Применительно к лопастям судовых движителей краткая теория флаттера выглядит примерно так: флаттер – это связанные изгибно-крутильные колебания с быстро увеличивающейся амплитудой. Эти колебания обусловлены тем, что в лопастях типичных движителей центры приложения гидродинамических сил в профильных сечениях располагаются перед осями жесткости лопасти и центрами масс сечений. Поэтому при движении лопасти возникает момент сил, стремящийся скрутить ее в сторону увеличения угла атаки, а также изогнуть ее в продольном направлении, так что лопасть представляет собой динамически неустойчивую систему, стремящуюся выйти из равновесия. Этому противодействуют силы упругости, инерции, внутреннего трения, а также силы инерции и трения в окружающем потоке. Все эти факторы в целом определяют способность системы сохранять колебательную устойчивость, характеризуемую коэффициентом демпфирования колебаний. Начиная с некоторой скорости демпфи-

рующих свойств, присущих данной лопасти, оказывается недостаточно, и в этот момент возникают нарастающие по амплитуде связанные изгибно-крутильные колебания – флаттер.

**Резонанс.** Явление резонанса возникает при совпадении частоты какого-либо тона колебаний лопасти (изгибных или крутильных) с частотой периодических сил в неравномерном поле скоростей набегающего потока. Оно достаточно исследовано в турбостроении, схожие процессы имеют место и при работе колеса Грима, при этом существенны следующие факторы: неравномерность поля скоростей набегающего потока в результате обтекания корпуса судна и периодическое взаимодействие лопастей винта и колеса Грима. Вследствие невысокой жесткости удлиненных лопастей колеса на них возможно развитие как флаттера, так и резонанса.

**Тряска лопастей.** Рассмотрим последний вид колебаний. На скоростях ниже тех, что вызывают флаттер, и в отсутствие резонанса появляются интенсивные вибрации лопастей, названные нами ранее «тряской». Что это за явление?

Дело в том, что кроме колебаний, происходящих на частоте вынуждающих импульсов, часто возникают колебания на собственной частоте тела, но с периодичностью вынуждающей силы. Такое высказывание часто вызывает недоумение и даже отторжение у людей, знакомых с теорией колебаний. Они привыкли считать, что если имеется вынуждающая сила, то она обязательно вызовет вынужденные колебания. Однако на самом деле подавляющее большинство колебаний в природе происходит на собственной частоте, но с периодичностью вынуждающего воздействия.

Проделаем следующий опыт. Возьмем обычную линейку, прижмем один конец к столу, чтобы второй свисал свободно, и начнем стучать по этому свободному концу с периодичностью, скажем, один удар в секунду. В соответствии с теорией гармонических колебаний следовало бы ожидать, что свободные колебания постепенно затихнут, и линейка начнет колебаться с частотой вынуждающей силы, т.е. 1 Гц. Однако линейка сколь угодно долго будет колебаться на собствен-

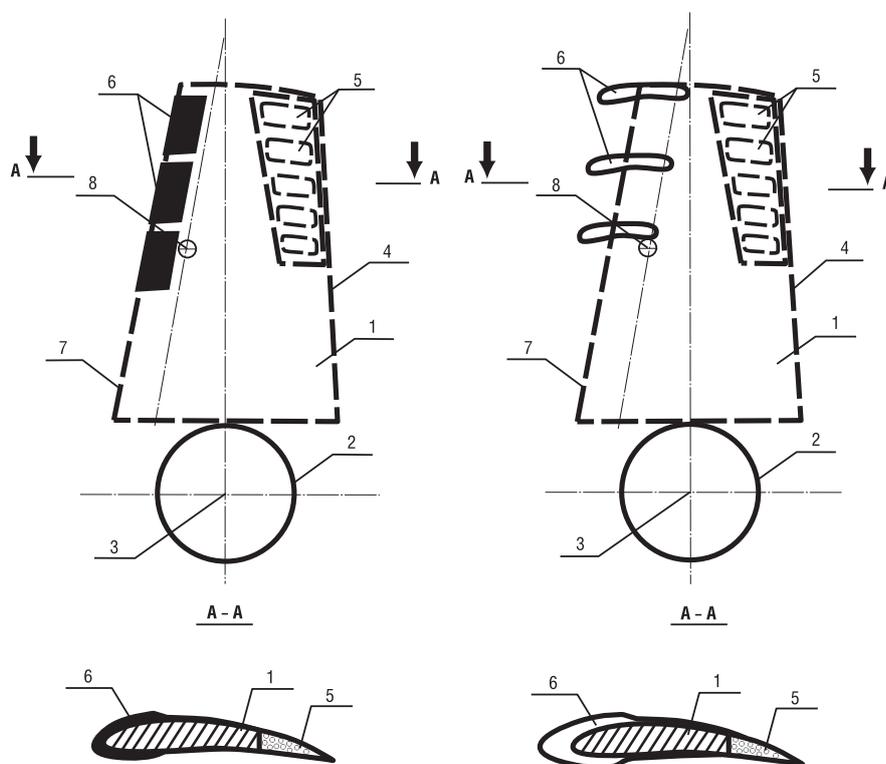


Рис.2. Способы перераспределения массы лопасти с помощью дополнительных грузов и пустот, повышающего ее устойчивость против флаттера. 1 – лопасть; 2 – ступица; 3 – центр вращения; 4 – выходящая кромка; 5 – вырезы вдоль выходящей кромки; 6 – грузы вблизи входящей кромки; 7 – входящая кромка; 8 – ЦПС

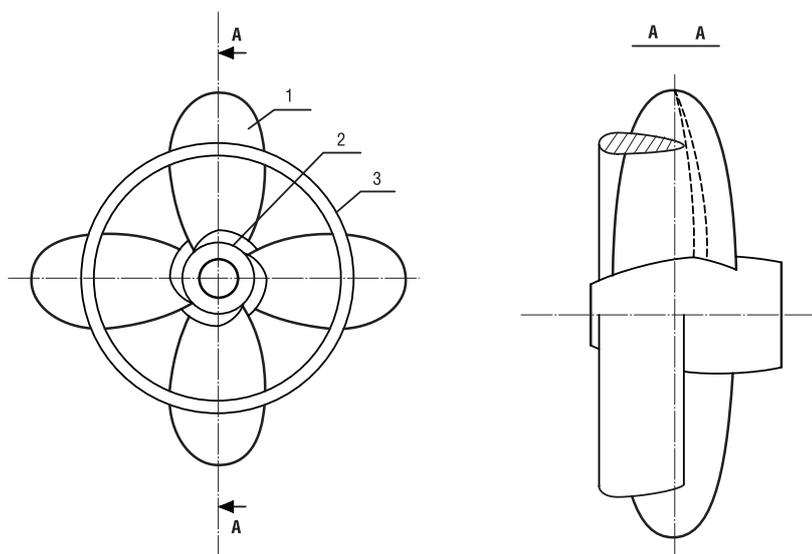


Рис.3. Соединение входящих кромок лопастей сплошным кольцом, значительно повышающим их прочность и жесткость: 1 – лопасть; 2 – ступица; 3 – кольцо

ной частоте, но с периодичностью ударов по ней, как при игре на струнных музыкальных инструментах. Теория права? Нет, просто она применяется неправильно. Действительно, вынужденные колебания возникают, но при следующем условии: обе частоты должны быть если не близкими, то хотя бы одного порядка, что в нашем примере не выполняется. Кроме того, вынуждающая сила носит негармонический характер, что в сочетании с низкой частотой придает ей уже характер не вынуждающей силы, а статического отклонения. При работе и гребных, и воздушных винтов такие явления имеют место, их и будем называть «тряской лопастей». Ей подвержены гребные винты практически всех быстроходных судов.

Вот как описывают свои ощущения от перехода через Атлантику на лайнере «Нормандия» И.Ильф и Е.Петров («Одноэтажная Америка»): «Все задрожало на корме, где мы помещались. Дрожали палубы, стены, иллюминаторы, шезлонги, стаканы над умывальником, сам умывальник. Вибрация парохода была столь сильной, что начали издавать звуки даже такие предметы, от которых никак этого нельзя было ожидать. Впервые в жизни мы слышали, как звучит полотенце, мыло, ковер на полу, бумага на столе, занавески, воротничок, брошенный на кровать. Звучало и гремело все, что находилось в каюте». Если столь интенсивной тряске подвержены обычные гребные винты, то колеса Грима с их нежесткими лопастями и тяжелыми условиями работы в возмущенном по-

токе должны быть подвержены ей в еще большей степени.

### Способы борьбы

Итак, для успешной работы колес Грима (а также любых винтов с недостаточно жесткими лопастями – прим. ред.) необходимо преодолеть их виброактивность. Рассмотрим прежде всего способы борьбы с флаттером. В настоящее время имеются четкие рекомендации по этому вопросу.

Как пишет авиаконструктор А.С.Яковлев, «момент возникновения флаттера можно отодвинуть за пределы максимальной скорости полета, повысив жесткость конструкции и применив дополнительные конструктивные мероприятия: увеличив отношение частоты собственных крутильных колебаний к частоте изгибных; снизив погонный массовый момент инерции крыла; сместив ЦТ сечений крыла в максимально вперед (например, установкой грузов в носке крыла)». Кроме того, для отдаления порога наступления флаттера применяют профили с максимально задним расположением аэродинамического фокуса, придают для крыльев материалы с большими внутренними потерями.

Интересно, что многие из этих рекомендаций широко известны в судостроении, где, например, применяют винты с большим дисковым отношением, более стойкие к кавитации и с лопастями повышенной жесткости. Часто винты изготавливаются из дорогих, но обладающих высоким демпфированием никелевых сплавов (актуально для ЧПВ,

подверженных высоким ударным нагрузкам – прим. ред.). Особенно широко в последнее время используется саблевидность лопастей – та же стреловидность применительно к лопастям винтов.

Из уже сказанного следует, что мероприятия, направленные на избежание флаттера, очень эффективны для снижения виброактивности лопастей и на более низких скоростях. Полностью ликвидировать ее можно, повысив жесткость лопастей выше некоторой определенной величины. Об этом говорит опыт американского лайнера – победителя гонок на приз «Голубой ленты Атлантики» «Юнайтед Стейтс». Его достоинством было практически полное отсутствие вибрации на ходу. По свидетельству пассажиров, при движении судна со скоростью более 30 уз в буфетах даже не гремела посуда.

### Как с этим бороться?

Для того чтобы виброактивные лопасти стали работоспособны, необходимо отодвинуть границу наступления флаттера и «тряски лопастей», например, правильной центровкой поперечных сечений. Для этого можно в районе входящей кромки лопасти разместить грузы, как показано на рис 2. Грузы могут быть изготовлены из того же материала, что и лопасть, и заодно с ней. Достоинство такого способа – возможность выноса ЦТ далеко вперед, даже за входящую кромку (рис. 2 а). Можно изготовить грузы и из более плотного материала, разместив в носке профиля или в виде накладки на передней кромке (рис. 2 б).

Возможен другой способ носовой центровки – путем соединения передних кромок лопастей сплошным кольцом, как показано на рис. 2. Этот способ хорош еще тем, что одновременно возрастает и жесткость лопастей, и их прочность. Аналогичные способы применяют и при изготовлении лопаток паровых турбин. Для снижения виброактивности лопаток их связывают между собой бандажками.

Применение таких мер, в частности, к колесам Грима позволило бы реабилитировать их, снизив риск самопроизвольного разрушения и, таким образом, сэкономить на морском флоте до 10% все более дорожающего минерального топлива.