

**В** процессе эксплуатации судов ледового плавания их отдельные корпусные конструкции подвергаются ледовым нагрузкам, восприятие которых превышает возможности упругих свойств материала. Хотя это явление – уже давно общепризнанный факт, серьезные исследования поведения конструкций в условиях пластической области, т.е. в условиях нелинейного деформирования, появились только в последнее время, и многие стороны такого поведения еще недостаточно изучены. Отсутствует и общепризнанный подход к критерию отказа, т.е. к нормативным требованиям к допускаемым нагрузкам.

Учет пластических деформаций и исследование работоспособности конструкций в условиях достижения этих деформаций позволяет во многих случаях вскрыть дополнительные ресурсы прочности.

Строительство на ФГУП «Адмиралтейские верфи» судов ледового плавания для отечественных судовладельцев и перспективы предложений по созданию судов арктического плавания других типов делает актуальным исследование поведения конструкций корпуса таких судов в условиях упруго-пластических деформаций.

Поведение конструкций под действием ледовых нагрузок в пластической области не подчиняется законам линейности, что ранее затрудняло решение уравнений, определяющих зависимость этого поведения от нагружения.

Сегодня современные средства прикладной математики и программного обеспечения позволяют разрешать многие виды нелинейностей: большие деформации, большие перемещения, мембранный эффект, пластичность, как зависящую, так и независящую от скорости нагружения, вязкопластичность, ползучесть, нелинейную упругость, гиперэластичность, вязкоэластичность, а также хрупкое разрушение и даже объемное увеличение материала под воздействием облучения.

Возможности компьютерных программных комплексов конечно-элементного анализа позволяют на совершенно иной, чем традиционные аналитические методы, основе проводить анализ и прогнозирование надежности конструкций, работающих в области пластического деформирования.

Применение для решения нелинейных задач метода конечных элементов в совокупности с итерационными процедурами позволяет получить параметры напряженно-деформированного состояния в любой точке конструкции, определить предельные нагрузки для конструкции любой сложности. При использовании высокоточных пластинчато-стержневых конечно-элементных моделей появляется возможность опре-

# АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ В УСЛОВИЯХ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

**А.П. Матлах,**  
*проф. СПбГМТУ, генеральный директор НПО «Полярная звезда»*

деления зон текучести вблизи концентраторов.

Для моделирования процессов упруго-пластического деформирования была избрана модель физического поведения материала, базирующаяся на условии текучести, законе течения и законе упрочнения.

Условие текучести определяет уровень напряжений, при достижении которых начинаются пластические деформации. Для сложного напряженного состояния условие текучести записывается как уравнение зависимости от предела текучести функции компонентов тензора напряжений. Это уравнение описывает некоторую поверхность в пространстве напряжений, которая называется поверхностью текучести. Если для какой-либо точки тела вектор напряжений находится внутри поверхности текучести, то эта точка деформируется упруго. В случае, если вектор напряжений находится вне поверхности текучести, в точке развиваются пластические деформации.

Закон течения, определяющий направление развития пластических деформаций, может быть определен дифференцированием компонента вектора пластических деформаций, который, в свою очередь, является произведением производной функции напряжений (пластического потенциала) на множитель Лагранжа (пластический множитель).

Если функция напряжений равна функции компонентов тензора напряжений, то пластические деформации развиваются в направлении нормали к поверхности течения.

Закон упрочнения описывает изменение поверхности течения в процессе развития пластических деформаций. В большинстве программных систем возможны изотропное или кинематическое упрочнение. В первом случае центр поверхности течения остается в процессе деформирования в начальной

точке. Кинематическое упрочнение предполагает, что размеры поверхности остаются постоянными, а сама поверхность перемещается в пространстве напряжений.

В качестве модели пластического деформирования была применена модель классического билинейного кинематического упрочнения. В ней используется критерий текучести Мизеса, где сравнивается значение предела текучести при статическом растяжении со значением эквивалентного напряжения по Мизесу. Предел текучести и тангенциальный модуль экспериментально установлены для многих материалов.

В случае кинематического упрочнения поверхность текучести, оставаясь постоянной в размерах, смещается с развитием течения в пространстве напряжений.

Для разрешения конечно-элементной модели с учетом вышеприведенных нелинейностей используется линеаризация процесса нагружения – процесса, при котором нагружение разбивается на несколько шагов; на протяжении одного шага жесткость системы, зависящая в общем случае от геометрической и от физической нелинейностей, остается постоянной. Сохранение процесса на реальной кривой «усилие–перемещение» в соответствии с нелинейной жесткостью обеспечивается итерационным методом Ньютона–Рафсона.

Прогнозирование поведения конструкции за пределами упругости ведется на основе аппарата теории пластичности для описания напряженно-деформированного состояния на дифференциальном уровне.

Использованная в работе теория предельного равновесия учитывает как геометрические и топологические особенности судового корпуса, так и традиционные для строительной механики корабля подходы. В качестве меры несущей способности конструкции оп-

ределяется предельная нагрузка, под которой понимается такое характерное значение внешней нагрузки, когда вследствие развивающихся пластических деформаций перемещения становятся практически неограниченными. В рамках расчетов предельных нагрузок судовых конструкций были приняты следующие допущения:

- материал корпуса считается жестко-пластическим (упругими деформациями в процессе расчета пренебрегают) или идеально-упругопластическим (диаграмма  $\sigma - \epsilon$  материала считается билинейной с бесконечной площадкой текучести);

- пластические деформации развиваются в ограниченном объеме, называемом пластическим шарниром. Для балки пластический шарнир представляет собой точку, для пластины – линию.

Предусматривалась следующая схема передачи внутренних усилий в конструкции, соответствующая традиционной для строительной механики иерархии конструктивных элементов: от обшивки к набору и далее на опорный контур перекрытий (палубы, платформы, переборки),

Механизм (кинематическая схема) перехода конструкции в предельное состояние определялся заранее. Если рассматривалось несколько возможных кинематических схем, то предельной нагрузкой считалась минимальная предельная нагрузка, выбранная из всех учтенных механизмов разрушения.

Считается, что действительная предельная нагрузка  $p_0$  удовлетворяет неравенству  $p_c \leq p_0 \leq p_k$ , где  $p_c$  – предельная нагрузка, определенная статическим способом,  $p_k$  – предельная нагрузка, определенная кинематическим способом.

Таким образом, использование экстремальных теорем позволяет получить для предельной нагрузки оценку сверху и снизу.

Приращение пластической деформации вычисляется в численной реализации. Согласно закону упрочнения совместно с кинематическим упрочнением происходит изменение предела текучести. Величина приращения пластической деформации зависит от полного приращения деформации, текущего напряженного состояния, закона течения и вида потенциала.

Для получения условия неразрывности используется обратная схема Эйлера. Она гарантирует нахождение вновь получаемых напряжений, деформаций и внутренних переменных на поверхности текучести.

Эквивалентные пластические деформации и эквивалентные напряжения вычисляются с учетом выбранной модели пластичности. Заметим, что обратная схе-

ма интегрирования Эйлера является радиально-возвратным алгоритмом (по Кригу) для критерия текучести Мизеса.

Касательная или упругопластическая напряженно-деформированная матрица выводится из локальной итерационной схемы Ньютона–Рафсона. Как правило, для получения удовлетворительного решения требуется более одной итерации. Процедура Ньютона–Рафсона гарантирует сходимость решения тогда и только тогда, когда решение на произвольной итерации достаточно близко к точному.

Если матрица жесткости обновляется на каждой итерации, процесс носит название полной процедуры Ньютона–Рафсона. В работе применялся именно этот вид процедуры. Возможно также применение модифицированной процедуры.

Описанный итерационный процесс продолжается до достижения сходимости. Решение получено окончательно, когда вектор внутренних усилий, получаемый по текущему напряженно-деформируемому состоянию, приблизится с требуемой точностью к вектору приложенных нагрузок.

Были выполнены численные исследования поведения конструкции судов ледового плавания в области пластического деформирования на базе разработанной математической модели деформирования корпусных конструкций. В частности, проведен развернутый численный анализ напряженно-деформированного состояния таких элементов, как балка и перекрытие.

чато нагружения конструкции, от большого начального вплоть до максимального значения. Зависимость вертикальных перемещений нижней точки балки от прилагаемой поперечной нагрузки приведена на рис.2.

Такие же развернутые расчеты проведены для нескольких моделей перекрытий. Выполнен расчет реального бортового перекрытия ледового пояса конкретного судна (рис.3). Была оценена чувствительность конечного результата к расположению пятна нагрузки по площади перекрытия, граничным условиям на кромках перекрытия, форме эпюры распределения ледового давления по площади контактной зоны, кривизне поверхности перекрытия.

В результате расчета получена зависимость максимальной суммарной деформации (упругая плюс пластическая составляющая) от расчетного давления в пятне контакта. Выявлены факторы, слабо и сильно влияющие на конечный результат.

К слабо влияющим относятся форма эпюры давлений, кривизна перекрытия, граничные условия на вертикальной кромке. К сильно влияющим относятся такие факторы, как положение пятна контакта на площади перекрытия и граничные условия на горизонтальной кромке.

Получено удовлетворительное совпадение с результатами теории предельного равновесия.

Особо были рассмотрены вопросы критериев отказа пластически дефор-

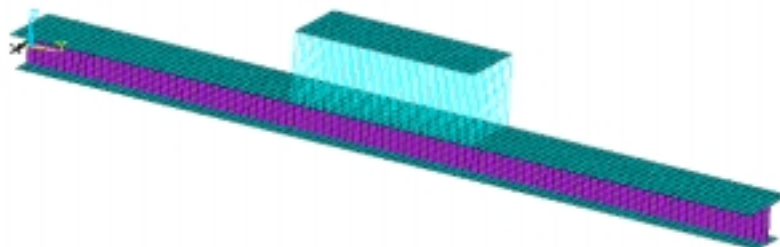


Рис.1. Расчетная конечно-элементная модель нагружаемой конструкции

Расчетная конечно-элементная модель балки с учетом приложенной нагрузки приведена на рис.1.

Принято, что балка жестко закреплена по концам и нагружена поперечной нагрузкой, приложенной в средней ее части на некотором протяжении.

Для исключения местных деформаций верхней полки балки в месте приложения нагрузки предложена схема передачи нагрузки, равномерно распределенной по площади нагружения, через амортизаторы.

Был принят метод ступен-

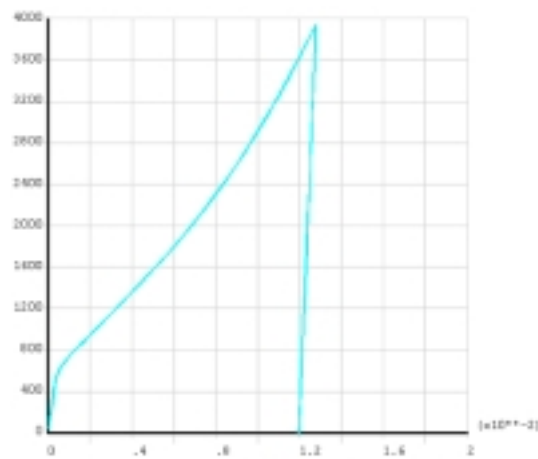


Рис.2. Зависимость вертикальных перемещений нижней точки в среднем сечении балки от поперечной нагрузки

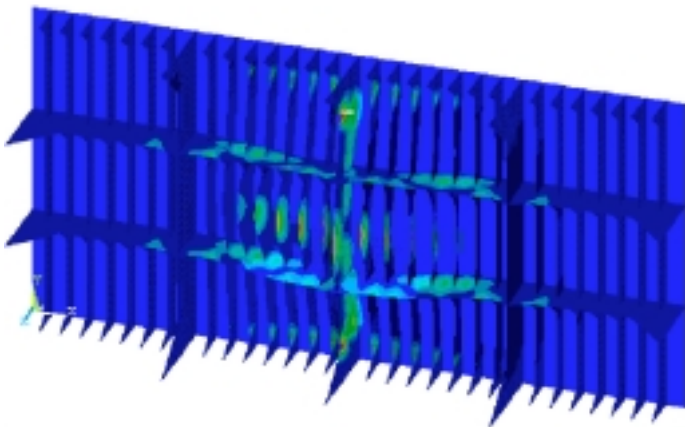


Рис. 3. Распределение пластических деформаций в бортовом перекрытии судна ледового типа

мируемых конструкций. Критерий отказа – одно из основных понятий прикладной теории надежности. Под критерием отказа понимается совокупность формальных условий, выполнение которых позволяет сделать заключение о неработоспособности технического объекта, в данном случае конструкции корпуса судна или ее конструктивно-го элемента.

Определенная методами теории предельного равновесия предельная нагрузка, которая традиционно на стадии проектирования используется в качестве меры несущей способности, зависит лишь от одного параметра – предела текучести материала и не учитывает упрочнения материала за пределом упругого деформирования.

Любой критерий отказа, используемый для прогнозирования надежности конструкции, должен удовлетворять двум условиям: реально отражать и интерпретировать полученную инструментальным способом информацию по повреждаемости конструкции и иметь разработанный теоретический (аналитический или численный) аппарат для расчета напряженно-деформированного состояния конструкции при заданной внешней нагрузке.

Были сформулированы требования к критериям отказа элементов пластически деформируемых конструкций.

В общем случае район конструкции или конструктивный элемент считаются отказавшим после некоторого периода эксплуатации, если он после соответствующего обследования и выявления количественных значений факторов, снижающих надежность конструкции – износ конструктивных элементов, остаточные пластические деформации и трещины в них, признается неспособным далее выполнять свои функции.

В исследованиях в качестве критерия отказа принят деформационный критерий в варианте  $\epsilon_{pl} \geq k \cdot \delta$  или явное ограничение  $\epsilon_{pl}$ .

В описанных расчетах использо-

вались два уровня отказов: отказ перекрытия в целом и отказ отдельных конструктивных элементов. Для перекрытия в целом в качестве критерия отказа использовался или критерий текучести, или критерий, соответствующий традиционному критерию предельного состояния.

Для отдельных элементов в качестве критерия отказа использовались величины допустимых остаточных пластических деформаций, полученные обратным анализом норм дефектации конструкций.

В соответствии с критериями отказа выполнялась многоуровневая процедура расчетов прочности конструкции. На первом уровне проводился анализ прочности бортового перекрытия в целом и определялось ледовое давление  $p_1$  в зависимости от размера пятна контакта, которое вызывает отказ перекрытия в целом. Этот этап позволил выделить зоны развития пластических деформаций и определить места установки подкреплений.

На втором уровне моделировалась совместная работа обшивки и набора между рамными связями и определялось ледовое давление  $p_2$  в зависимости от размеров пятна контакта. На этом этапе выполнялся расчет в области пластических деформаций с учетом возникающей геометрической нелинейности.

Третий уровень содержал анализ прочности отдельных конструктивных элементов узла: деформации поясков балок, выпучен в стенках диафрагмы, листов переборок, палуб, платформ, примыкающих к наружной обшивке.

В заключение следует отметить, что выполненные работы позволили развить новые и усовершенствовать известные методы строительной механики корабля, относящиеся к исследованию особенностей упруго-пластического деформирования конструкций при локальных ледовых нагрузках, решить некоторые задачи учета нелинейности при упруго-пластическом деформировании конструкций и сформулировать подходы к назначению критериев отказа. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аполлонов Е.М. Проектирование конструкций ледовых усилений по

критерию предельной прочности // Судостроение. – № 2. – 1992.

- Беленький Л.М. Расчет судовых конструкций в пластической стадии. – Л.: Судостроение, 1983.
- Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969.
- Койтер В.Е. Общие теоремы упругопластических сред. – М.: Гослитиздат, 1961.
- Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1985.
- Матлах А.П., Родионов А.А. Повышение эффективности и конкурентоспособности вновь создаваемых судов при проектировании их корпусных конструкций // Морской вестник. – 2004. – № 1(9). – С. 67-69.
- Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М.: Мир, 1976.
- Родионов А.А. Математические методы проектирования оптимальных конструкций судового корпуса. – Л.: Судостроение, 1990.
- Родионов А.А., Самсонов Г.Б. Численное моделирование статических и динамических откликов стационарной платформы на волновые и ледовые воздействия. – Тр. конф. по строительной механике корабля памяти акад. Ю.А. Шиманского. – НТО им. акад. А.Н. Крылова (декабрь 2001 г.), Санкт-Петербург, с. 85-87.
- Тимофеев О.Я., Николаев П.М. Накопление остаточных деформаций в металлических конструкциях под воздействием ледовых нагрузок: Воздействие льда на инженерные объекты / Под ред. В.А. Лихоманова. СПб.: Экспресс-Информация, Гидрометеоиздат, 1997. – Вып. 6.
- Шиманский Ю.А. Справочник по строительной механике корабля. – Т. 3. – Л., 1958.
- Ansys theory Reference // SAS IP, Inc., 1971-1999.
- Bond J., Kennedy S. Physical Testing and Finite Element Analysis of Icebreaking Ship Structures in the Post Yield Region. – Proceeding of the Eighth (1998). – International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal, Canada, May 24-29. 1998. – Vol. II. – P. 577-585.
- Timofeev O., Klenov A., Krupina N. The Measurement of Ice Loads onboard Icebreaker "Kapitan Dranitzin": the Method of the Primitive Data Processing and Results Description Proc. of intern. conf. ICETECH2000, September 2000, St. Petersburg. ■

Рецензенты:

Е.Я. Вороненков, д-р техн. наук, проф.,  
Е.И. Картузов, д-р техн. наук, проф.

**В** сентябре 2004 г. исполнилось 100 лет со дня образования кафедры строительной механики корабля СПбГМТУ. Отсчет времени своего существования кафедра ведет с момента образования кафедры строительной механики корабля на кораблестроительном отделении вновь открывшегося в 1902 г. в Петербурге Политехнического института. Она была создана по инициативе крупнейшего ученого, математика и кораблестроителя Алексея Николаевича Крылова.

Следует отметить, что кафедра появилась, когда самой науки – строительной механики корабля – еще не существовало.

Основателем кафедры, ее первым профессором и заведующим был Иван Григорьевич Бубнов, выдающийся кораблестроитель, главный конструктор и создатель первых отечественных подводных лодок. Он явился также творцом науки о прочности – строительной механики корабля, позволившей впервые строить корпусные конструкции стальных судов не «на глазок», а на основе строгой математической научной теории.

# К 100-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ КОРАБЛЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО МОРСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Ю.Н. Кормилицин,**  
*д-р техн. наук, проф.,*  
*генеральный конструктор НАПЛ, ФГУП «ЦКБ МТ «Рубин»»*



**И.Г. Бубнов (1872-1919)**



**С.П. Тимошенко (1878-1972)**



**П.Ф. Папкович (1887-1946)**

Первые его труды по строительной механике – это изданные литографским способом записи лекций. Определяющее значение для развития не только отечественного, но и мирового судостроения имели написанные им позже курсы «Теория упругости» и «Строительная механика корабля».

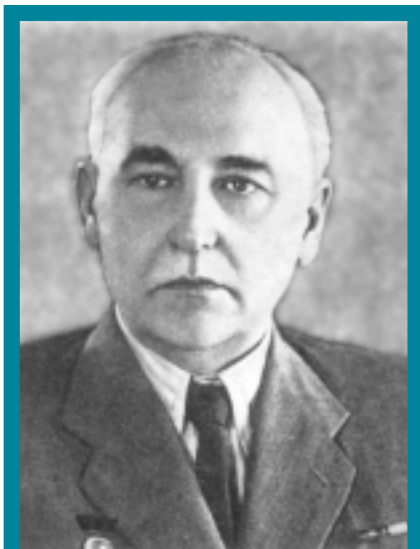
Лекции на кафедре читали лучшие специалисты, признанные в мире ученые. Курс вибрации корабля читал А.Н. Крылов, курс строительной механики и теории упругости – Сте-

пан Прокофьевич Тимошенко, ставший фактически заведующим кафедрой в 1917 г., после перехода И.Г. Бубнова в связи с условиями военного времени полностью на военную службу.

В последующие годы кафедрой руководил Петр Федорович Папкович – выдающийся ученый мирового значения, автор трудов, ставших настоящей энциклопедией по строительной механике. Он создал на кафедре крупнейшую научную школу в области строительной механики корабля,

воспитал десятки специалистов отечественного флота, внесших немалый вклад в дальнейшее развитие науки.

Многое сделал для развития судостроения Юлиан Александрович Шиманский, выдающийся ученый-кораблестроитель, академик, сменивший П.Ф. Папковича на посту руководителя кафедры. Вместе с П.Ф. Папковичем он участвовал в рассмотрении практически всех вопросов, связанных с прочностью корпусов военных кораблей, строившихся в стране. Одновременно многие



*Ю.А. Шиманский (1883-1962)*



*А.А. Курдюмов (1911-1968)*

годы он руководил Всесоюзным научно-техническим обществом судостроителей.

Далее кафедру последовательно возглавляли крупные ученые Александр Александрович Курдюмов, Валерий Александрович Постнов, воспринявшие традиции развития новых направлений. Каждый из них сформировал свою научную школу, сохранив при этом преемственность наряду с постоянным движением вперед. К участию в преподавании строительной механики корабля были привлечены видные работники промышленности и ученые.

Немало внесли в развитие строительной механики корабля также широко известные своими работами сотрудники кафедры Дмитрий Михайлович Ростовцев, Виталий Васильевич Козляков, бывший в течение

четырёх лет заведующим кафедрой Сергей Владимирович Петин, действующий заведующий кафедрой Александр Александрович Родионов и многие другие.

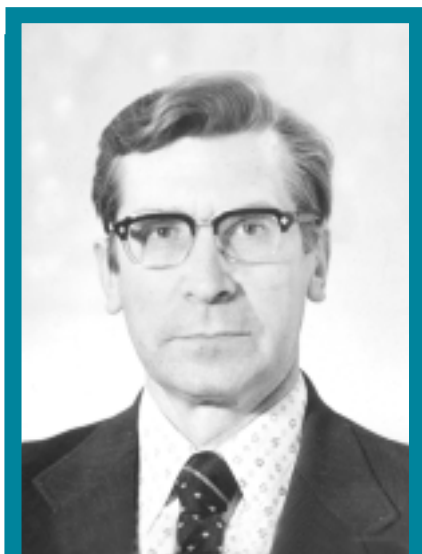
Подготовленные кафедрой выпускники института работают во всех конструкторских бюро и институтах отрасли. Высокий технический уровень прочности и надежности построенных при их участии судов и кораблей в значительной степени определены уровнем подготовки инженеров-кораблестроителей в годы учебы. Можно быть уверенным, что и будущие выпускники кафедры будут достойными последователями выдающихся отечественных прочнистов.

ЦКБ МТ «Рубин» постоянно сотрудничает с кафедрой, привлекая ее специалистов к решению проблем

обеспечения прочности, конструктивной надежности создаваемых подводных лодок и морских инженерных сооружений.

Современное состояние отечественной науки о прочности корабля является результатом деятельности многих научно-исследовательских учреждений и ученых. Заметную долю в идеи, теорию и практическое воплощение науки составляет вклад кафедры. Творческая атмосфера, расширяющиеся связи с промышленностью и тесные научные контакты с ведущими конструкторскими бюро и институтами способствуют дальнейшему росту ее авторитета.

Хотелось бы поздравить всех ее работников со славным юбилеем и пожелать им дальнейших творческих успехов. ■



*В.А. Постнов (род. 1927)*



*С.В. Петин (род. 1935)*



*А.А. Родионов (род. 1949)*

Феномен – необычайное, особенное явление, редкий факт.

Большой толковый словарь, 2000, с. 1419.

Автор работы [1] в введении пишет: «Считая ЛВ-исчисление специальным разделом дискретной математики и чисто российским «изобретением», которое не следует путать с вероятностной логикой и другими разделами математической логики, скажем несколько слов об истории публикаций на эту тему».

А я в предисловии к монографии [1] писал, что Клод Эшвуд Шеннон сумел ликвидировать разрыв между алгебраической теорией логики и ее практическим применением, *соединив булеву алгебру с работой электрических схем*.

В связи с необходимостью количественной оценки безотказности сложных технических структур в начале 60-х гг. XX столетия возникло так называемое *логико-вероятностное исчисление (ЛВИ)* – составная часть раздела математики, трактующая правила вычисления и оперирования с высказываниями, принятыми в двузначной логике.

С помощью ЛВИ удалось *соединить булеву алгебру с теорией вероятностей* не только для простейших структур, но и структур, формализация которых приводит к функциям алгебры логики (ФАЛ) повторного типа (мостикового, сетевого, монотонного). В состав этого своеобразного «мостика знаний» входят несколько доказанных теорем, свойств и алгоритмов, которые и составляют математическую основу ЛВИ.

Сетую в статье [2] на отсутствие определения даже *вероятностной логики* в «Математическом энциклопедическом словаре» (1988), не следует удивляться феномену ЛВИ, известному только специалистам технического профиля, связанным с проблемами надежности, живучести и безопасности (НЖБ) [3, 4]. До сих пор в фундаментальных математических энциклопедиях и справочниках нет упоминания ЛВИ, это свидетельствует, на наш взгляд, о том, что данные вопросы не изучаются «чистыми» математиками в университетах. Практически все творцы современного понимания ЛВИ (ЛВМ), как и Дж. Буль, не имели специального математического образования, но были высокочемпионами инженерами.

Желая привлечь внимание «чистых» математиков к проблемам ЛВИ, я в докладе на II Международном конгрессе «Математические методы в надежности» [5] заявил: «Математик, в совершенстве знающий алгебру ло-

# ФЕНОМЕН ЛОГИКО- ВЕРОЯТНОСТНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ

**И.А. Рябинин,**  
академик РАН, д-р техн. наук, проф.

гики и теорию вероятностей, но не знакомый с ЛВМ, не сможет преобразовать ФАЛ трех структур к форме перехода к полному замещению (ФППЗ) и соответствующим вероятностным функциям» [3, с. 17]. При этом в докладе приводились ФАЛ, упомянутые в [3, с. 115, 175, 183], и полиномы, полученные в [3, с. 117, 178, 185].

Долгое время ЛВИ в статьях и книгах отождествлялись с вероятностной логикой, пока в работе [2, с. 184] мне не пришлось прямо сказать, что *ЛВИ – это не вероятностная логика*.

Ну а толчком к написанию данной статьи послужило недавнее знакомство с работой [6], в которой логик Я.Я. Голота был огорчен «вычислительными вольностями», допущенными не только Л.А. Заде в «Теории нечетких множеств», но и И.А. Рябининым с Г.Н. Черкесовым в «Логико-вероятностных методах» [7].

Не имея возможности ознакомиться с другими публикациями этого автора, процитируем главные «вычислительные вольности» по тезисам доклада [6].

1. «Алгебра логики высказываний исходит из полной определенности объектов изучения. Теория вероятностей предполагает неопределенность в совершении событий. Таким образом, в одной теории объединяются *отрицающие друг друга начала*: полная определенность и неопределенность. Не говорит ли это *об очевидном противоречии* (здесь и далее – выделения наши – И.Р.), лежащем в основе логико-вероятностной теории?».

2. «Но это не единственный промах, допущенный авторами ЛВМ. Второй требует более детального рассмотрения. Как понимать в приведенной цитате сочетание слов «**вероятность истинности функций алгебры логики**»?»

Далее автор поясняет, что в теории вероятностей рассматриваются и оцениваются события, а не высказывания, посредством которых сообщается о событиях. Ссылается на широ-

коизвестные курсы по теории вероятностей (1939, 1965, 1969 гг.), где «... говорить о вероятности истинности высказываний не принято ... Да и само понятие вероятности, вообравшее в себя многовековой опыт употребления его, не дает повода считать, что традиционное представление о вероятности допускает понимание вероятности как **оценку истинности высказываний**».

Наконец-то обнаружилось то принципиальное непонимание ЛВИ «чистыми» математиками, придерживающимися многовекового опыта и широкоизвестных курсов.

Сначала успокоим по части классического использования понятия «вероятность» при оценке **событий**, связанных с отказом технических изделий. Действительно, в середине XX в. трудно еще было свыкнуться с возможностью количественной оценки безотказности. В [3] гл. 3 целиком посвящена «проблеме исходных данных», а до этого вышли десятки книг и справочников на эту тему.

Теперь обратим внимание на слова: «**высказывания, посредством которых сообщается о событиях**». Таким образом, высказывание «**элемент  $x_i$  отказал**» сообщает о реальном возможном событии, которое можно записать в виде

$$Q_i(t) = P\{T_i < t\} = P\{x_i=0\} = P\{x_i'=1\}, \quad (1)$$

где  $Q_i(t)$  – вероятность отказа  $x_i$  элемента за время  $t$ ;  $T_i$  – случайное время безотказной работы элемента  $x_i$ ;  $P$  – символ вероятности;  $x_i = 0$  – сообщение об отказе элемента  $x_i$ ;  $x_i'=1$  – отрицание истинности.

Следует подчеркнуть, что взаимные переходы от языка **высказываний** к языку **событий** и обратно совершаются таким образом, что каждое событие сопоставляется с высказыванием о его **наступлении**, а высказывание сопоставляется с событием, состоящим в том, что оно оказалось **истинным**.

Авторы [7], учитывая то, что событийная теория вероятностей и мате-

математическая логика (в случае исчисления высказываний) являются дистрибутивными структурами, и следуя Колмогорову [8, с.36], дали такое определение «вероятностной функции» (ВФ):

$$P\{f(x_1, \dots, x_n) = 1\}, \quad (2)$$

где  $f(x_1, \dots, x_n)$  – двоичная функция алгебры логики от  $n$  аргументов, которая сообщает о работоспособности сложной системы.

Таким образом, сначала инженеры научились количественно оценивать безотказность отдельных элементов с помощью вероятностей  $Q_i(t)$ , а затем нужно было «изобрести» средства формализации работоспособности (или отказа) структурно-сложной системы.

Для простых структур (последовательных, параллельных, древовидных) ничего изобретать было не нужно, но решать проблемы НЖБ только с помощью формулы полной вероятности и вербального перебора множества гипотез оказалось практически невозможным.

Будем считать, что, как в свое время «повезло» К.Э. Шеннону и М.А. Гаврилову с аппаратом алгебры логики для схем с мостиковыми соединениями, так и нам [7] повезло с формализацией работоспособности структурно-сложных систем, обладающих свойством булевости.

Отвечая на первый упрек Я.Я. Голоты, можно сказать, что, объединяя в ЛВИ полную определенность (при формализации задачи) с неопределенностью состояния (каждого элемента системы), эти начала не отрицают друг друга, а удачно дополняют, т.е. являются компонентами, обеспечивающими прозрачность расчетов, а уж никак не «вычислительными вольностремиями».

Отвечая на второй упрек о «промахе», связанном с вероятностью истинности ФАЛ (2), следует заметить, что она применительно к произвольному высказыванию действительно не имеет смысла, но  $f(x_1, \dots, x_n)$  – это не произвольное, а конкретное сообщение о событиях, связанных с надежностью (безопасностью) каждого элемента системы.

Можно согласиться с тем, что с позиций традиционной теории вероятностей формула (2) лишена смысла, но ЛВИ – это не общеизвестные курсы, а оригинальная отечественная теория, признанная в мире. Монография [7] в 1987 г. была переведена на японский язык, а книга [1] издается в США.

В цитате Е.Д. Соложенцева [1] о ЛВИ как о чисто «русском» изобретении указана и дата его появления, а именно – начало 60-х гг. XX столетия. Может быть, настало время ра-

зобраться в этом более подробно.

Выдающийся представитель российского флота вице-адмирал С.О. Макаров впервые на страницах журнала «Морской сборник» в работе [9] дал определение нового понятия – живучести судна как его способности продолжать бой, имея повреждения в различных боевых частях. На протяжении 60 последующих лет проблемой живучести кораблей и судов занимались многие ученые и инженеры (академики А.Н. Крылов, Н.С. Соломенко, профессора И.Г. Бубнов, Л.А. Безнос и др.). В середине XX в. очередь дошла и до электриков. Боеспособность корабля находится в полной зависимости от успешной работы его электроэнергетической системы. При потере электроэнергии корабль лишается не только своих боевых качеств, но и способности вести успешную борьбу за живучесть самого корабля. На кафедре электроэнергетических систем кораблей (ЭСК) Военно-морской академии кораблестроения и вооружения имени А.Н. Крылова (ВМАКВ) передо мной была поставлена задача создания теоретических основ проектирования ЭСК, в том числе метода расчета ее живучести.

Случилось так, что к этому моменту я уже был знаком с двоичным исчислением, булевой алгеброй и разнообразными электрическими схемами. Знал работы В.И. Шестакова (1939) и М.А. Гаврилова (1950). Поэтому ничего удивительного для меня не было, когда в работе условия работоспособности ЭСК я стал записывать с помощью алгебры логики, а вероятность уязвимости системы вычислять по формуле вероятности логической суммы совместных событий через вероятности логических произведений элементарных событий [10]. Последние вычислялись как отношение поверхности поражения элемента  $S_A$  к общей поверхности поражения корабля  $S_K$  при допущении равномерного закона распределения поражающих воздействий (бомб, снарядов и др.).

Борьба с иностранщиной и кибернетикой в те годы не позволила мне в книге пользоваться знаками конъюнкции & и дизъюнкции V, пришлось заменить их на русские союзы «И» и «ИЛИ». А сам метод был назван не логико-вероятностным, а методом комбинаторики. И только через 20 лет в статье [11] этот метод и расчетный пример был повторен в полном соответствии с его сутью, т.е. ЛВИ.

В публикациях 1965, 1967, и 1969 гг. [12, 13, 14], используя аппарат алгебры логики для исследования вопросов надежности, я активно рекламировал ЛВМ, а статья [12] была специ-

ально написана по просьбе редакции для облегчения понимания *других статей этого журнала, изданного удвоенным тиражом*. В этой статье я ссылался на работу [15], в которой, по моим данным, впервые было употреблено словосочетание **логико-вероятностный метод**. Кому именно принадлежит авторство этого понятия, сказать не могу, поиск более ранних публикаций с таким названием метода пока не увенчался успехом.

В работе [13, §24, с. 249] написано: «Метод расчета надежности судовых электроэнергетических систем, при котором структура СЭС описывается средствами математической логики, а количественная оценка ее надежности производится с помощью теории вероятностей, будем называть **логико-вероятностным методом**».

Непосредственным толчком заняться поиском такого метода послужила просьба заместителя главного конструктора по электроэнергетической системе атомной подводной лодки пр. 671 (1963) А.Н. Губанова. Он обратился ко мне с предложением уменьшить число перемычек между бортами с двух до одной и оценить при этом величину снижения надежности всей системы. Когда я обнаружил свою неспособность строго математически оценить вклад перемычек в безотказность системы, пришлось сохранить обе перемычки и заняться выяснением этого феномена. Так появилось и определение **структурно-сложной системы (ССС)**, под которой мы понимаем [3, с. 12] такие системы, которые при математическом описании не сводятся к последовательным, параллельным или древовидным структурам. СССР описываются сценариями сетевого типа с циклами и неустранимой повторяемостью аргументов при их формализации.

Впервые о **вероятности истинности** функции алгебры логики высказался Д.А. Поспелов [16, с. 306] в основной теореме вероятностной логики. В теореме «42» им сформулировано:

«Вероятность истинности любой функции алгебры логики, зависящей от  $n$  аргументов, может быть подсчитана по следующей формуле:

$$P_j = \sum_1 P_{q_i}, \quad (3)$$

где сумма берется лишь по тем наборам аргументов, при которых данная функция обращается в единицу».

Развитие ЛВИ шло как по линии совершенствования культуры формализации СССР, так и по линии разработки специальных алгоритмов, позволяющих переходить от ФАЛ к ВФ без перехода к совершенной дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ). Аналогия между операциями алгебры ло-

гики и элементарными свойствами **вероятностей**, очевидная ряды математиков (Дж. Булю, П.С. Порецкому, С.Н. Бернштейну и др. [4, с. 800]), к 1956 г. привела к двум принципиально разным подходам:

- **вероятностной логике** Дж. фон Неймана [37],

- **логике вероятностей** Н. Руша [38].

В публикации [38] «Расширение формализации алгебры логики на вероятности» указывается, как нужно изменить СДНФ, чтобы вместо **логических переменных** можно было подставить **вероятности их осуществления** и таким образом получить **вероятность осуществления сложного высказывания**.

Так, в монографии [17, с. 267] впервые были строго обоснованы понятия **кратчайший путь успешного функционирования системы (КПУФ)**, **минимальные сечения отказов системы (МСО)**, **монотонная структура ФАЛ**, **функция работоспособности системы (ФРС)**.

Там же были представлены четыре алгоритма преобразования повторных ФАЛ: **разрезания, ортогонализации, табличный и схемно-логический**.

В третьем издании [18] монографии [17] на английском языке впервые были рассмотрены новые понятия ЛВИ: **булева разность** [18, с. 483], **вес** и **значимость** аргумента, а также один из способов математической формализации ФРС [18, с. 465].

Первый в стране официальный учебник по надежности, допущенный Министерством высшего и среднего образования СССР для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Электрооборудование судов», был издан в 1974 г. [19]. В нем ЛВМ проиллюстрированы не только на примере сложных структур, но и на последовательно-параллельных структурах, что было вызвано необходимостью демонстрации широких возможностей метода, созданного первоначально для СССР. Кроме того, в эти годы стали появляться работы, в которых на графиках структурно-логических схем (так называемые деревья отказов/событий) изображались знаки конъюнкции и дизъюнкции.

Незнание возможностей ЛВМ и самого метода приводит к тому, что до самого последнего времени [20] продолжают попытки решать технические задачи на сложных структурах путем преобразования их в последовательно-параллельные структуры с помощью решения системы нелинейных алгебраических уравнений.

При использовании ЛВМ сама формализация задачи надежности СССР приводит к ФРС, в которой аргументы  $x_i$  в КПУФ есть не что иное, как

последовательное соединение, а сами пути  $P_i$  «соединены» параллельно. Трудности решения задач на сложных структурах с помощью ЛВМ перемещаются из области эквивалентирования («звезда-треугольник») в область исчисления вероятностей повторных ФАЛ с абсолютной точностью, в принципе недостижимой при эквивалентировании.

Еще печальнее констатировать, что самая совершенная (по мнению авторов [21]) американская программа Relax до сих пор не способна решать задачи на сложных структурах.

Отвергая критику Я. Я. Голоты по поводу «ляпсуса» с ЛВМ, завершим феномен ЛВИ большой цитатой из статьи [6], с которой мы полностью согласны: «... Надо отдавать себе отчет, что никакие призывы соблюдать нормы научного мышления не изменяют положения дел на «логическом фронте». В российской науке ситуация может измениться в лучшую сторону только в том случае, если нормы строгого мышления, нормы логика станут нормой повседневного мышления, если логика превратится из науки для избранных в науку для большинства.

Это же может произойти лишь в одном случае, если логика станет неприменимым элементом образования и школьного, и вузовского. Никому не приходит в голову спрашивать: зачем нужно в школе преподавать русский язык? Зачем надо обучать арифметике? Чтобы люди не мыслили абсурдно, надо, чтобы не возникало только вопроса: зачем нужна логика в системе образования?

Логика нужна не только для того, чтобы умело проектировать и эксплуатировать ЭВМ, логика – в первую очередь элемент общения».

Как видно из предыдущего материала, первые двадцать лет (1962–1982) ЛВИ развивались так сказать «в глубину», сознательно сдерживаемые стремлениям учесть как можно больше **черт действительности** под флагом адекватности, понимаемой как наибольшее соответствие модели реальной системе.

Но адекватность, на наш взгляд, следует понимать и как наибольшее соответствие реальным возможностям обеспечить модель **исходными данными**. Интенсивные исследования проблемы исходных данных для оценки надежности уникальных изделий (мощных турбин, кузнечно-прессового оборудования большой мощности, сложных автоматических систем специального назначения и др.) или устройств, изготавливаемых сравнительно небольшими сериями (генераторы, преобразователи, электродвигатели, насосы и др.), показали, что даже при жестком разделении их состояния толь-

ко на работоспособное и отказ (1 и 0) оценка вероятностей  $Q_i(t)$ ,  $R_i(t)$  достигается тяжелым трудом, длительными статистическими наблюдениями и большими затратами. Альтернативой объективному подходу к оценке этих вероятностей становится **субъективно-идеалистическое** назначение их.

Многие появившиеся в эти годы модели и методы оценки надежности сложных систем (обобщенный структурный метод, топологический метод, логико-графический, марковский и др.) не были обеспечены объективными исходными данными (соответствующими интенсивностями отказов, восстановлений и переходов; безошибочностью и быстродействием операторов и др.), а посему **ничего было подставлять** в эти формулы и алгоритмы.

Возвращая внимание специалистов, исследующих проблемы надежности структурно-сложных систем, «**назад к Дж. Булю и детерминизму**» (максимальной определенности, жесткости высказываний и простоте), мы часто убеждались в их стремлении развить эту науку «в ширину». Перефразируя Б. Пастернака об опыте больших поэтов, скажем: «**Простота** всего важнее людям, Но **сложное** понятней им». Может быть, и не понятней, но уж приятней – это точно.

А.С. Кравец [22, с. 34] писал: «... В системах вероятностной логики принимаются все значения вероятности в интервале [0, 1]. Эта характеристика истинности высказываний является более гибкой и диалектичной, чем жесткое разделение всех высказываний в классической логике на только истинные и только ложные. Мы согласны с утверждениями Г.И. Рузавина, что с содержательной точки зрения вероятностная логика представляет собой более адекватное отражение действительности, чем обычная классическая логика».

Спасибо хоть за то, что обычную двузначную логику называют еще **классической**.

Сдерживая активность в так называемом «развитии» самой классической логики (в направлении ее многозначности, непрерывности, нечеткости и др.) на изучении только **монотонных** ФАЛ, удалось доказать ряд теорем и свойств этих ФАЛ [3, с. 32]. Все конкретные результаты, формулы и однопараметрические вероятностные полиномы были получены вручную (в том числе и для знаменитой задачи № 35 [23]). Затем были разработаны алгоритмы 148, 149, 186 [24, 25, 26] и соответствующие программы для БЭСМ, тщательно проверенные на уже решенных «эталонных» задачах.

Кроме того, правильность решений



проверялась профессорами Е.А. Архангельским и К.В. Недалковым путем полного перебора всех состояний, записанных в СДНФ, а в последнее время – и доктором физико-математических наук профессором Н.В. Ховановым путем чисто теоретико-вероятностного решения с помощью формулы полной вероятности и обозначений пересечений и объединений соответствующих множеств. До сих пор как-то не было нужды в доказательствах отсутствия «**вычислительных вольностей**», огорчающих логика Я.Я. Голоту [6], но, может быть, остались и другие сомневающиеся в **нашем объединении** полной определенности (ФАЛ) и неопределенности  $Q_i(t)$ .

После тщательной апробации ЛВИ на монотонных структурах, а также введения в 1976 г. [18] операции **строгой дизъюнкции** (сложения по модулю два), которая связана с операциями конъюнкции и дизъюнкции формулой:

$$\Phi(A) \oplus \Phi(B) \Leftrightarrow (A \wedge \neg B) \vee (\neg A \wedge B), (4)$$

где  $A, B$  – не пустые множества, высказывания;  $F$  – знак операции над высказываниями, для которых истинностное значение  $F(A_1, \dots, A_n)$  полностью определяется истинностными значениями  $A_1, \dots, A_n$ ;  $\oplus$  – знак суммы по модулю два;  $\Leftrightarrow$  – знак эквиваленции, «тогда и только тогда, когда»;  $\neg$  – знак отрицания;  $\wedge$  – знак конъюнкции;  $\vee$  – знак дизъюнкции, получила полное гражданство и операция **отрицания**.

Современный разговор о формуле (4) содержится в статье [27] и книге [28, с. 42]. В 1988 г. в книге [29] А.С. Можаяев объявил о рождении **нового общего логико-вероятностного метода** (ОЛВМ), в котором кроме операций конъюнкции и дизъюнкции участвует и отрицание, т. е. функционально-полный набор операций алгебры логики. Это позволило автору выйти «из плена» монотонных структур. Но главное достоинство работы [29] состоит, по нашему мнению, не в учете вредного влияния отдельных элементов на надежность системы, а в разработке **универсального графоаналитического метода** (УГМ), алгоритма и программного модуля «**LOG**» построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем, доступно изложенного (еще раз через 15 лет) в работе [30, с. 101–110]. Строго формализованное описание структур и аналитическое представление сложных событий автор осуществил с помощью так названной **схемы функциональной целостности** (СФЦ), а формализованное представление общих логических условий исследуемого режима работы системы

осуществил путем построения **логического критерия функционирования** (ЛКФ).

ФРС определяется путем отыскания решения **системы логических уравнений**, соответствующего СФЦ и ЛКФ исследуемой системы. УГМ автором был разработан в 1983 г., а в 1985 г. полностью автоматизирован [31].

И только через 20 лет наметился некоторый спрос на знания, накопленные в Военно-морской академии группой ученых (профессоры А.С. Можаяев, Ю.М. Парфенов, А.С. Смирнов и др.), поверивших в могущество дискретной математики (алгебры логики, комбинаторики, алгебры множеств и др.) и электронно-вычислительной техники (ЭЦВМ, БЭСМ, ЕС ЭВМ, ПЭВМ).

На основе теории ЛВИ (ЛВМ, ОЛВМ) удалось автоматизировать самые сложные и громоздкие процессы построения различных математических моделей систем **большой размерности и высокой структурной сложности** [23, 29, 30–34].

Рынок знаний «стоит» на их репутации и доверии к ним. Экономика знаний нуждается в измерениях. В США для этого существуют разные единицы, одни из самых распространенных – число патентов, а также количество людей, потребляющих знания. Знания – специфический продукт, который нельзя продавать «на пробу». В пленарном докладе [35, с. 24–29] я писал: «... Возвращаясь к понятию **научная школа** как явлению, связанному с формированием **новой идеи**, нового видения природы, связанное с разработкой нового, эффективного метода познания и построения мастерской передачи знаний, следует признать, что главной целью школы МА БР являлось стремление к получению **нового знания**. Занятие **фундаментальной наукой** – это чрезвычайно тяжелый труд, требующий исключительно высокого нервного и интеллектуального напряжения, особых способностей к абстрагированию и восприятию окружающего мира.

Утрата традиций в фундаментальных науках делает страну практически беззащитной перед лицом катастроф, экологических бедствий и, несомненно, понизит уровень ее обороноспособности.

Зарубежная научная общественность, понимая, что наша фундаментальная наука принадлежит всему человечеству, пользуется ее плодами и оперативно превращает в **лицензированный продукт**, обладающий потребительской стоимостью. Можно только сожалеть, что отечественные программные комплексы, построенные в те же годы на новых знаниях, но проигрывающие «по сумме баллов»

программе Relex [21], до сих пор не стали таким продуктом.

Уже завершив написание статьи, инициированной критикой кандидата физ.-мат. наук Я.Я. Голоты моей работы [7] по причине «**объединения отрицающих друг друга начал**», автору стала известна книга [36] выдающихся американских математиков Роланда Грэхема, Дональда Кнута и Орена Паташника. Оказывается, и в США еще в 1970 г. обнаружилось, что математика, которая требовалась для досконального обоснованного истолкования компьютерных программ, совершенно отличалась от классической абстрактной математики.

Абстрактная математика стала вырождаться и терять связь с действительностью. Авторы [36] пишут: «... Погоня за обобщениями оказалась столь захватывающей, что целое поколение математиков потеряло способность находить прелесть в частностях, в том числе получать удовольствие от решения численных задач или оценивать по достоинству роль математических методов».

Под названием *конкретной математики* авторы понимают смесь **континуальной** и **дискретной** математики, упорядоченный набор *инструментов*, позволяющих оперировать с дискретными объектами. Книга [36] представляет собой введение в математику, которая служит основой *информатики и анализа алгоритмов*.

В аннотации сообщается, что она раскрывает тайну одного *феномена американского образования* – как превращать малограмотных школьников в прекрасных математиков.

Не могу утверждать, что феномен логико-вероятностного исчисления превращает рядовых инженеров в прекрасных математиков, но имею основание говорить, что специалисты, овладевшие логико-вероятностными методами, становятся на голову выше в практических вопросах надежности, живучести и безопасности, по сравнению с кем угодно (даже с кандидатами и докторами физ.-мат. наук, специалистами фирмы Relex [21] и выпускниками технических вузов страны). ■

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соложенцев Е.Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. – СПб.: Изд. Дом «Бизнес-пресса», 2004, 216 с.
2. Рябинин И.А. Логико-вероятностное исчисление как аппарат исследования надежности и безопасности структурно-сложных систем // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 7. – С. 178 – 186.
3. Он же. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000, 248 с.

4. *Он же*. Ленинградская научная школа логико-вероятностных методов исследования надежности и безопасности структурно-сложных систем. – В кн.: Наука Санкт-Петербурга и морская мощь России, 2002, т. 2, с. 797 – 811.
5. *Ryabinin I.A.* Logical-Probabilistic Methods and Their Possibilities. – Second International Conference on Mathematical Methods in Reliability, Bordeaux, France, July 4-7. – ABSTRACTS BOOK. – 2000. – Vol. 2. – P. 920-922.
6. *Голота Я.Я.* О двух «вычислительных вольностях», огорчающих логика // <http://www.inftech.webservis.ru/it/conference/scm/2000/session4/golota2.htm>.
7. *Рябинин И.А., Черкесов С.Н.* Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. – М.: Радио и связь, 1981, 264 с.
8. *Колмогоров А.Н.* Основные понятия теории вероятностей. – М.: Наука, 1974, 118 с.
9. *Макаров С.О.* Разбор элементов, составляющих боевую силу судов // Морской сборник. – 1894. – № 6. – С. 1-106.
10. *Рябинин И.А.* Теоретические основы проектирования электроэнергетических систем корабля. – Л.: Изд. ВМА, 1964, с. 13, 218-245.
11. *Волик Б.Г., Рябинин И.А.* Эффективность, надежность и живучесть управляющих систем // Автоматика и телемеханика. 1984. – № 12. – С. 151-160.
12. *Рябинин И.А.* Об использовании аппарата алгебры логики для исследования вопросов надежности // Судовая электротехника и связь. – 1965. – № 28. – С. 30-35.
13. *Он же*. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. – Л.: Судостроение, 1967, 362 с.
14. *Он же*. Аналитические логико-вероятностные методы расчета надежности судовых электроэнергетических систем. – Л.: Судостроение. – 1969. – Вып. 133. – С. 4-20.
15. *Кондрашов В.А., Макаров С.В., Осипов В.А., Филатов А.В.* Логико-вероятностный метод расчета надежности судовых энергетических установок // Вычислительные системы: Сб. тр. ИМ СО АН СССР, Новосибирск, 1964. – Вып. 13.
16. *Поспелов Д.А.* Логические методы анализа и синтеза схем. – М.-Л.: Энергия, 1964, 320 с.
17. *Рябинин И.А.* Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. – Л.: Судостроение, 1971, Изд. 2-е, 456 с.
18. *Ryabinin I.A.* Reliability of Engineering Systems. Principles and Analysis. – М.: Mir, 1976, 532 p.
19. *Рябинин И.А., Киреев Ю.Н.* Надежность судовых электроэнергетических систем и судового электрооборудования. – Л.: Судостроение, 1974, 264 с.
20. *Ковалев А.П., Спиваковский А.В.* О преобразованиях «треугольник-звезда» в расчетах надежности сложных по структуре схем, элементы которых могут находиться в трех состояниях // Электричество. – 1998. – № 10. – С. 70-74.
21. *Викторова В.С., Кунтиер Х., Петрухин Б.П., Степаняиц А.С.* Relex – программа анализа надежности, безопасности, рисков // Надежность. – 2003. – № 4 (7). – С.42-64.
22. *Кравец А.С.* Природа вероятности: (Философские аспекты). – М.: Мысль, 1976. – 173 с.
23. *Рябинин И.А.* Задача № 35 и история ее исследований // Морской Вестник. – 2003. – № 4(8). – С. 48-51.
24. *Рябинин И.А., Парфенов Ю.М., Юрлов Ю.Е.* Процедура получения функции работоспособности сложной технической системы путем построения деревьев орграфа. Алгоритм № 148. – Сб. алгоритмов и программ. – Л.: Изд. ВМА. – 1979. – Вып. 7.
25. *Рябинин И.А., Борисов С.С., Новиков Э.П., Парфенов Ю.М.* Процедура расчета надежности структурно-сложных технических систем логико-вероятностным методом с учетом энергетических характеристик элементов. Алгоритм № 149. – Сб. алгоритмов и программ. – Л.: Изд. ВМА. – 1979. – Вып. 7.
26. *Рябинин И.А., Грек Б.В., Борисов С.С.* Поиск минимальных сечений отказов структурно-сложных технических систем. Алгоритм № 186. – Сб. алгоритмов и программ. – Л.: Изд. ВМА. – 1982. – Вып. 8.
27. *Рябинин И.А.* Наука как генератор нового объективного знания. // Системы управления и обработки информации: Научн.-техн. сб. / ФНПЦ «НПО «Аврора». – СПб., 2003. – Вып. 5. – С. 84-94.
28. *Колмогоров А.Н., Драгалин А.Г.* Введение в математическую логику. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 120 с.
29. *Можаев А.С.* Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. – Л.: Изд. ВМА, 1988. – 67 с.
30. *Он же*. Универсальный графоаналитический метод, алгоритм и программный модуль построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем // Тр. III Международной научной школы «Моделирование и анализ безопасности и риска (МА БР – 2003)», 2003, август 20–23, СПб., 517 с.
31. *Он же*. Программный комплекс автоматизированного логико-вероятностного моделирования систем на ЕС ЭВМ // Приложение к канд. диссертации. – Л.: Изд. ВМА, 1983 – 1985.
32. *Можаев А.С., Гладкова И.А.* Библиотека программных модулей автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем и многочленов вероятностных функций (ЛОГ & ВФ). – Свид-во об офиц. регистрации № 2003 611100. – М.: Роспатент РФ, 2003.
33. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования (ПК АСМ СЗМА) // Техническая документация. СПб.: ОАО «СПИК СЗМА», 2003. Интернет-сайт: <http://www.szma.com/>. Свид-во об офиц. регистрации № 2003 611101. – М.: Роспатент РФ, 2003.
34. *Можаев А.С.* Программные средства автоматизированного моделирования и оценки надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования // Промышленная безопасность труда. – 2003. – № 6 ([www.aif-center.com](http://www.aif-center.com)).
35. *Рябинин И.А.* Научная школа «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах» и ее смысл // Тр. IV Международной научной школы МА БР 2004. – 2004, июнь 22-25, 650 с.
36. *Грэхем Р., Кнут Д., Паташник О.* Конкретная математика. Основание информатики. – М.: Мир, 1998. – 703 с.
37. *Нейман Дж.* Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент. – В кн: Автоматы. – М.: ИЛ, 1956, с. 68-139.
38. *Rouche N.* Extension aux probabilités du formalisme de l'algebre logique. (Руш. «Расширение формализма алгебры логики на вероятности»). Кумгу // РА. – 1956. – Т. 3. – № 5. – 179-182 (франц.).
39. *Колмогоров А.Н.* От редакции // Успехи математических наук. – 1938. – Вып. V. – с. 283.
- Р.С.* Эта статья является результатом информационной помощи четырех человек, которых я просто обязан искренне поблагодарить: *Т.И. Мигай* – дочь, которая через Интернет обнаружила доклад Я.Я. Голоты [6]; *Н.В. Хованова* – д-ра физ.-матем. наук, который проявил большой интерес к моим работам и через свою уникальную картотеку обнаружил Н. Руша [38]; *Е.Д. Соложенцева* – д-ра техн. наук, подарившего мне на день рождения свою статью «Вероятностная логика фон Неймана и логико-вероятностное исчисление И.А. Рябинина»; *В.В. Карасева* – канд. техн. наук, оперативно и грамотно набравшего весь текст статьи и разместившего материалы на Интернет сайте: <http://expertinfo.org/risks/mainrus.html> ■

**В**одометные движители (ВД), идея создания которых возникла еще в XVII в., получили достаточно широкое распространение во второй половине XIX в., когда они успешно конкурировали с другими типами движителей. В этот же период были заложены основы теории ВД, большой вклад в которую внес Н.Е. Жуковский, впервые записавший выражение для тяги ВД в современном виде:  $T_i = m(v_i - v)$ . Ранее использовалось выражение  $T_i = mv$ , справедливое только для ракетного движителя. Однако уже к концу столетия стало ясно, что по эффективности водометы уступают гребным винтам. Относительно более низкий КПД ВД обусловил их применение в тех случаях, когда специфические особенности этих движителей – возможность размещения внутри корпуса и защищенность от ударов о плавающие предметы рабочего колеса – играли определяющую роль.

Эти особенности наиболее четко проявляются на судах, эксплуатируемых на малых реках, как правило мелководных, имеющих большое транспортное значение в Сибири и северных районах страны, причем их общая протяженность достигает 50 тыс. км. Начиная с 50-х гг. прошлого века для этих рек строился большой транспортный флот, на судах которого широко применялись ВД. Это были буксиры, небольшие танкеры, сухогрузные и пассажирские суда, мощностью, не превышающей 500 кВт, но строились они большими сериями, так, только пассажирских судов типа «Заря» (рис. 1) было построено более 300 ед.

Более мощные ВД начали применяться на судах на подводных крыльях, гребные винты которых в условиях косоугольного потока подвергались эрозии. Кроме того, при больших скоростях кавитация гребных винтов приводила к падению КПД, и их преимущества по этому параметру по сравнению с водометами уменьшались. В 1962 г. началось строительство СПК типа «Чайка» с ВД мощностью 900 кВт, обеспечивающим судно скоростью до 95 км/ч,



Рис.1. Пассажирское судно типа «Заря»

## РАЗВИТИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В СОЗДАНИИ ВОДОМЕТНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ В РОССИИ

*М.А. Мавлюдов, канд. техн. наук,*

*В.А. Родионов, канд. техн. наук,*

*А.А. Русецкий, д-р техн. наук, проф., ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*

а в 1963 г. СПК «Беларусь-В» с установкой той же мощности, но рассчитанной на скорость хода 60 км/ч.

Наиболее крупным СПК, оборудованным ВД, является «Буревестник», построенный в 1964 г. Он был оборудован двумя ВД мощностью около 20 МВт на валу и развивал скорость до 95 км/ч. Все водометы СПК имели статические водозаборники с щелевым забором, вытянутым вдоль судна и осевые насосы (рис.2). В отличие от СПК «Чайка» и «Беларусь», имевших в качестве главных двигателей дизели, на «Буревестнике» были применены конвертированные авиационные газовые турбины. Именно поэтому данное отличное по эксплуатационным характеристикам судно было построено в единственном экземпляре – речной флот не располагал необходимой ремонтной базой для обслуживания таких двигателей.

Следующий этап развития ВД был связан с ВМФ. В 1956 г. началось проектирование противолодочного корабля водоизмещением около 400 т, который должен был развивать скорость свыше 30 уз. В этот период в стране

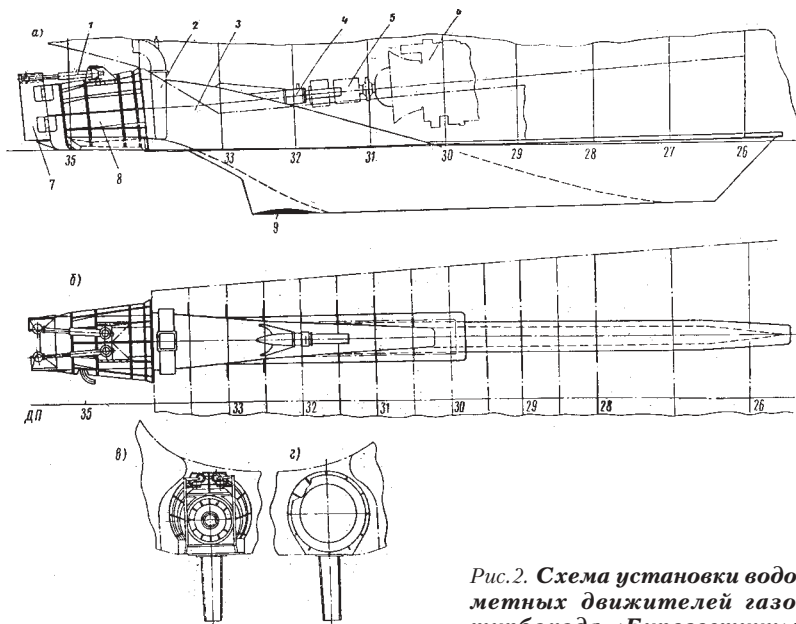
не было дизелей, агрегатная мощность которых обеспечивала бы подобную скорость при двухвальной установке, и не было системы типа CODOG, позволяющей совместить на одном валу дизель и газовую турбину. В связи с этим было принято решение создать оригинальный двухступенчатый ВД, первая ступень которого имела бы осевой насос, приводимый во вращение дизелем мощностью около 3 МВт, а ускорение потока во второй ступени осуществлялось за счет подачи воздуха от компрессора с приводом от газовой турбины мощностью 13,5 МВт (рис.3). Был построен и корабль с таким движителем (рис.4). На экономических ходах работала только первая ступень, а на полных ходах, когда суммарная мощность на валу была 16 МВт, использовались обе ступени.

Следует обратить внимание, что если для первой ступени КПД вала привода имело обычные значения около 0,98, то для второй ступени КПД передачи определялся произведением

$$\eta_B = \eta_K \cdot \eta_k \cdot \eta_n,$$

где  $\eta_k \approx 0,9$  – КПД компрессора;  $\eta_t$  – тепловые потери за счет охлаждения воздуха при подаче в движитель;  $\eta_n$  – потери за счет того, что воздух забираемый из атмосферы подается под воду в район движителя, где давление определяется заглублением.

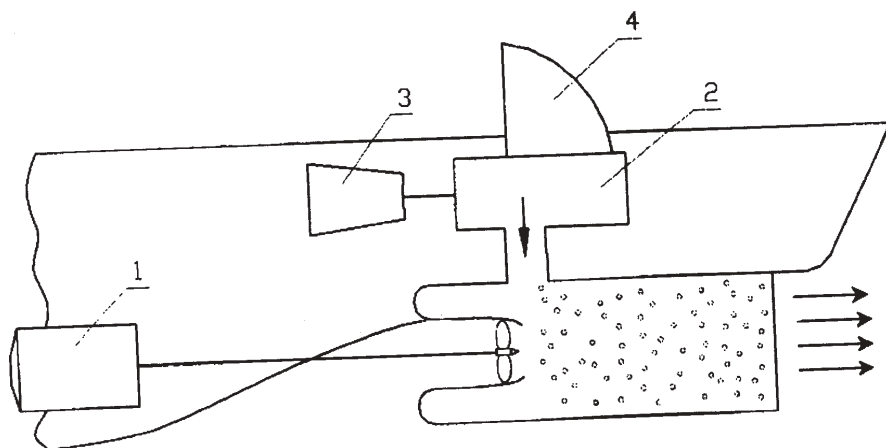
Для этого корабля коэффициент  $\eta_B$  составлял ок. 0,7. Разгон воды с помощью воздуха также был не очень эффективен, и вместо обычного насосного КПД, равного ок. 0,8, он для второй ступени составлял примерно 0,5. В результате суммарный пропульсивный коэффициент на полном ходу не превышал 0,35. Несмотря на низкую эффектив-



**Рис.2. Схема установки водометных двигателей газотурбохода «Буревестник»:**

**а – вид сбоку; б – вид сверху; в – вид в нос на левый движитель; г – сечение по водометной трубе ВД**

1 – гидроцилиндр управления створками; 2 – трубопровод воздушного клапана; 3 – водозаборник; 4 – дейдвуд; 5 – валопровод; 6 – главный двигатель; 7 – реверсивно-рулевое устройство; 8 – ВД; 9 – кормовое крыло



**Рис.3. Схема двухступенчатого ВД**



**Рис.4. Корабль с двухступенчатым ВД**



**Рис.5. Опытный корабль водоизмещением 100 т с двумя ВД**

ность, отсутствие другого технического решения привело к тому, что было построено 63 корабля, которые эксплуатировались в ВМФ СССР, Болгарии и Румынии. Однако дальнейшего применения эти движители, получившие название газодометных, не получили.

В связи с развитием в 70-х гг. истекшего столетия кораблей с динамическими принципами поддержания были развернуты работы по созданию ВД скеговых кораблей на воздушной подушке. В этот период были спроектированы и серийно строились скеговые пассажирские суда на воздушной подушке по трем проектам: «Зарница», «Орион» и «Чайка». «Зарница» предназначалась для малых рек, перевозку 48 пассажиров со скоростью порядка 20 уз, было построено более 100 таких судов. Суда «Орион» и «Чайка» были рассчитаны на 80 пассажиров, причем первое из них предназначалось для эксплуатации на реках, а второе было морским судном прибрежного плавания. Каждое из них оборудовалось двумя ВД на мощность ок. 400 кВт и развивало скорость 25–27 уз. Накопленный опыт позволил перейти к созданию оборудованных водометами кораблей на воздушной подушке для ВМФ.

На первом этапе был построен опытный корабль водоизмещением 100 т (рис.5). Корабль был оборудован двумя водометами, рассчитанными на мощность 2,2 МВт и установленными в скегах. На испытаниях была достигнута скорость 32 уз (рис.6). Успешные испытания этого корабля позволили перейти к проектированию движительного комплекса большого противолодочного корабля на скегах водоизмещением ок. 2000 т, оборудованного двумя движителями, рассчитанными на мощность примерно 30 МВт (рис.7).

Натурный ВД был изготовлен, однако в связи с сокращением программы судостроения корабль до конца построить не удалось.

В 1965–1975 гг. в нашей стране были созданы самые крупные и самые быстроходные в мире корабли на глубокопогруженных подводных крыльях (ок. 500 т, 60 уз). Они имели в качестве главных движителей угловые колонки мощностью 13–14 МВт. Однако эти колонки имеют весьма сложную конструкцию, дороги и недостаточно надежны. Поэтому были развернуты работы по созданию водометных движительных комплексов для КПК.

Поскольку эти корабли были рассчитаны на максимальную мореходность 5–6 баллов, для уменьшения вероятности прорыва воздуха к насосам предполагалось применить полнонапорные водозаборники. Для этих водозаборников очень важно выбрать оптимальную профилировку в районе входного отверстия, поскольку в процессе разгона, особенно в условиях волнения, характерно нали-

чие значительного «горба» сопротивления. Соотношение между скоростью хода и скоростью во входном участке водозаборника меняется в широких пределах. Чтобы избежать увеличения гидравлического сопротивления на входе и возможного возникновения кавитации водозаборника можно применять регулируемые водозаборники. В связи с этим была разработана оригинальная конструкция двухрежимного водозаборника, имеющего наряду с основным входным отверстием в напорной части два дополнительных отверстия в боковых стенках (рис.7). В процессе разгона эти отверстия находятся ниже ватерлинии и через них осуществляется дополнительное поступление воды. После подъема корабля на крылья отверстия выходят из воды. Во избежание прососа воздуха через эти отверстия канал водозаборника профилируется так, чтобы внутреннее давление в районе отверстия было равно атмосферному. В целом водозаборник проектируется таким образом, чтобы во всем диапазоне скоростей соотношение между скоростями внутри входного участка и вне водозаборника сохранялось по возможности неизменным, что позволяет рационально проектировать форму стенок входного участка водозаборника.

С целью проверки эффективности предложенной конструкции водомет с таким водозаборником был установлен на пассажирском катере «Невка» (рис.8). Испытания которого подтвердили его работоспособность. В 80-х гг. началось проектирование еще более крупного КПК водоизмещением около 600 т с двумя двигателями мощностью ок. 30 МВт и ВД. Учитывая ответственность проекта, была построена модель водоизмещением ок. 5 т (рис.9) с водометно-крыльевым комплексом (рис.10). Испытания на открытом водоеме показали высокую эффективность крыльевого и движительного комплекса, что позволило разработать проект корабля. Однако вследствие недостатка финансирования работы по его созданию были прекращены.

Проблема работы движителя, в насос которого прорывается воздух стала особенно острой после создания судов с каверной на днище, из хвостовой части которой воздух попадает в район водозаборного отверстия водомета (рис.10). В связи с этим была сформулирована идея движителя, работающего в условиях непрерывной подачи воздуха на рабочее колесо. Такой движитель получил название вентилируемого водомета. Рабочее колесо ВД имеет суперкавитирующую лопастную систему, причем на рабочем режиме воздух поступает на колесо со стороны струи, выбрасываемой в атмосферу. Движитель не имеет конического сопла, поджатие струи осуществляется за счет каверн формирующихся

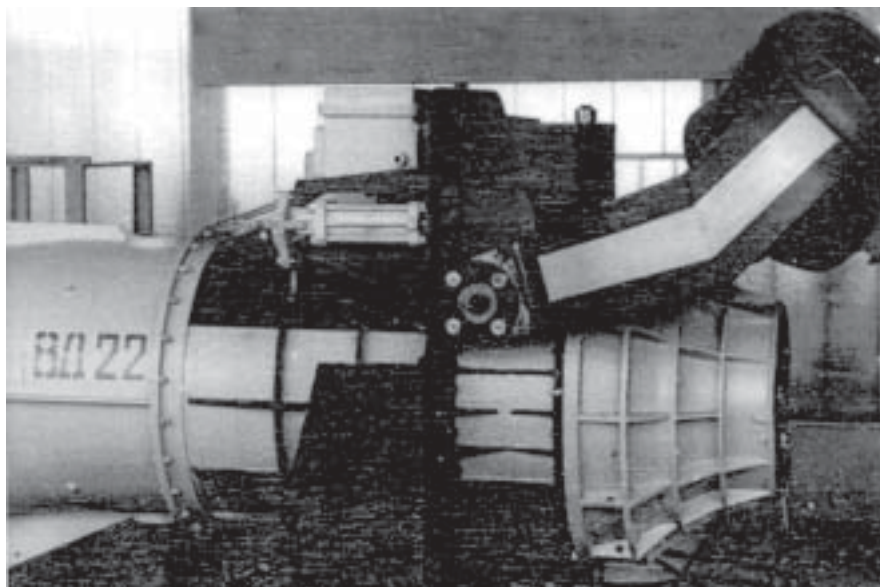


Рис.6. ВД с реверсивным устройством

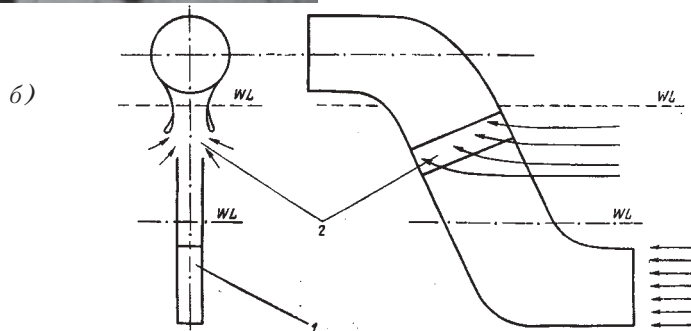


Рис.7. Конструкция двухрежимного водозаборника (а) и схема его действия (б)

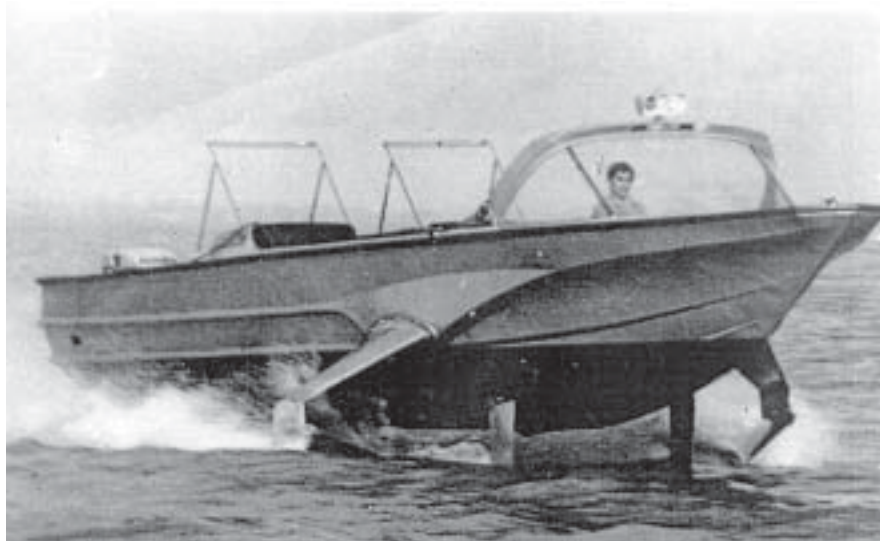


Рис.8. Пассажирский катер «Невка» с двухрежимным водозаборником

на лопастях. Поскольку за счет поступления атмосферного воздуха число кавитации практически всегда равно нулю, толщина каверн от скорости хода не зависит, и безразмерные характеристики рабочего колеса сохраняются постоянными и независимо от скорости. В начальном режиме работы движителя рабочее колесо полностью или частично располагается ниже ватерлинии (рис.11).

Модельные испытания показали, что на рабочем режиме КПД движителя при малых нагрузках может быть выше КПД традиционного водомета и достигать 0,6–0,7. Вентилируемый водомет был испытан на упоминавшемся выше опытном скеговом корабле на воздушной подушке, который развил с этим движителем скорость 34 уз. Конструктивно движитель существенно проще традиционного водомета, при его

использовании для управления кораблем используются расположенные вне струи рули, а реверс осуществляется за счет изменения направления вращения рабочего колеса. В связи с этим вентилируемые водометы требуют применения реверсивных двигателей.

Подобными движителями была оборудована серия десантных судов с каверной на днище (рис.12,б), и они показали хорошие эксплуатационные качества. Проблемы возникают в случае установки таких движителей на судах с выраженным «горбом» сопротивления. В настоящее время возможности совершенствования таких движителей полностью не исчерпаны. В частности, для судов на подводных крыльях предложена схема так называемого двухконтурного движителя (рис.12,а).

В настоящее время ВД традиционной конструкции успешно эксплуа-

тируются на судах и кораблях различных типов. Однако этим водометам присущи некоторые недостатки, основными из которых являются высокие массогабаритные характеристики и сложность конструкции рабочих колес и реверсивно-рулевых устройств. Как следствие этого, для их изготовления требуется специализированное высокотехнологичное производство, а стоимость их соизмерима со стоимостью двигателей. Кроме того, в случае кавитации и попадания воздуха в рабочее колесо тяговые характеристики водомета существенно ухудшаются. Для частичного преодоления этих недостатков разработана конструкция малогабаритного ВД (МГВД), основной конструктивной особенностью которого является отказ от традиционной круговой формы выбросного сопла и многолопастного спрямляющего аппарата за рабочим колесом, что позволило снизить габарит водомета на 30% (рис.13).

МГВД имеет удлиненную в поперечном направлении сопло прямоугольной формы и пару рулей, частично пересекающих сопло, которые обеспечивают хорошую управляемость на переднем ходу и реверсивно-рулевое устройство, специально разработанное для водомета такой конструкции. Водомет – совместная разработка ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» и ФГУП «МП «Звездочка», защищенной патентом.

Модельные испытания показали, что предлагаемая конструкция ВД обеспечивает пропульсивный коэффициент порядка 0,60–0,65, причем кавитация, которая может возникнуть в процессе разгона, не приводит к значительному снижению тяговых характеристик движителя.

Малые габариты и конструкция реверсивно-рулевого устройства позволяют опустить ось рабочего колеса так, что движитель частично выдвигается под корпусом. При такой компоновке снижается объем воды внутри корпуса судна, что ведет к повышению эффективности комплекса.

В 2003 г. водомет впервые был продемонстрирован на катере «Атлас» на выставке «Нева». Осенью он прошел испытания на различных режимах, включая очень тяжелые. Этой зимой велась разработка водомета мощностью 6000 кВт под конкретный заказ и одновременно проводились модельные испытания для доработки выявленных в рамках испытаний недостатков. Сейчас можно с уверенностью сказать, что все вопросы, возникшие при испытаниях, сняты, и водомет готов к внедрению. Организацией поставок и вопросами ценообразования занимается МП «Звездочка».

Представляется, что подобные движители вследствие своей относительно низкой стоимости найдут широкое применение на малых судах для ту-



Рис.9. Модель КПК водоизмещением ок. 5 т с ВД

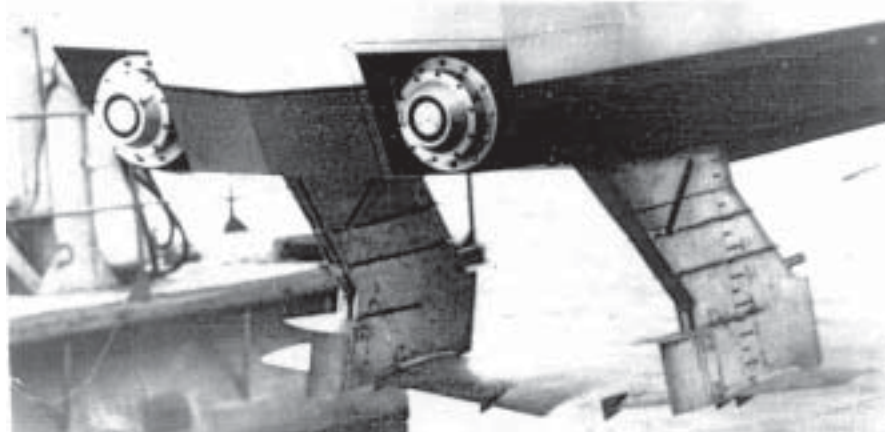


Рис.10. Водометно-крылевой комплекс модели

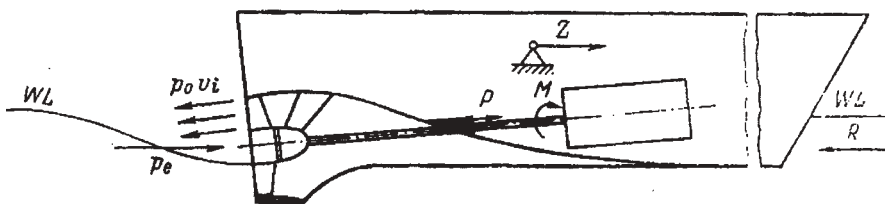


Рис.11. Схема вентилируемого ВД

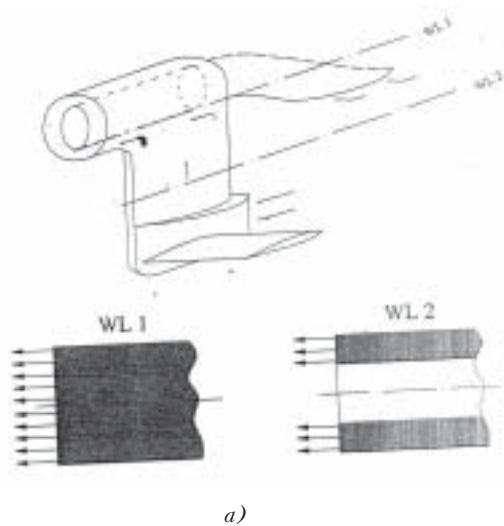


Рис.12. Схема двухконтурного ВД (а) и десантный корабль с каверной на днище, оборудованный таким ВД (б)

ризма и отдыха. Технологичность их изготовления, малые габариты, простота и надежность дают основание полагать, что все это может компенсировать некоторое снижение эффективности, и подобные движители найдут применение и на крупных судах.

В настоящее время ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова разрабатывает ряд МГВД в диапазоне мощностей 50–200 кВт. Хотя в дальнейшем предполагается расширить ряд в сторону больших мощностей, при достаточно большой мощности целесообразно переходить к индивидуальному проектированию водометов к конкретному судну.

В институте был создан комплекс экспериментальных установок и с их помощью получены систематические данные (характеристики) рабочих колес, сопротивление водозаборников, взаимодействие движителя с корпусом, а также характеристики реверсивно-рулевых устройств. С использованием этих систематических данных можно в стандартных случаях выбрать элементы движителя и выполнить расчет ходкости. Однако во всех ответственных случаях проводится цикл модельных испытаний, включающих испытания лопастной системы на гидродинамическом стенде, самоходные испытания в опытовом бассейне, а в ответственных случаях и испытания в кавитационном бассейне.

Гидродинамический стенд позволяет провести испытания водомета без водозаборного устройства при различных числах кавитации, причем наряду с упором и моментом на валу рабочего колеса измерять и упор движителя. Если рассматривать результаты, полученные на стенде, как характеристики движителя «в свободной воде», то можно разработать метод определения коэффициентов взаимодействия, который аналогичен методу, используемому при испытаниях винтов. Для этой цели проводятся буксировочные испытания модели, у которой входное отверстие во-

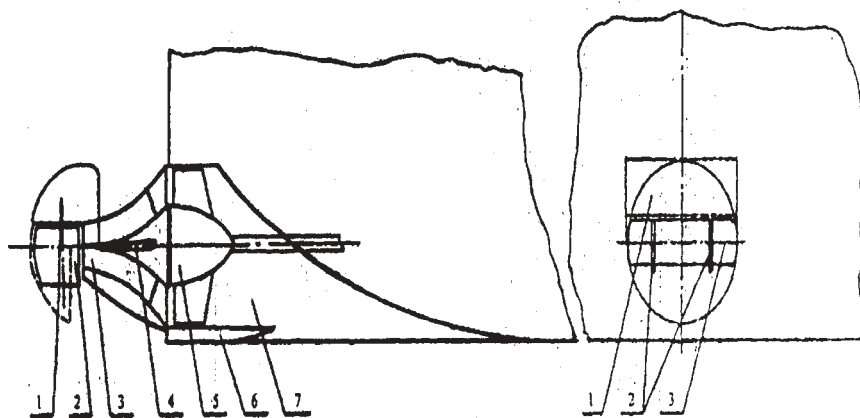


Рис.13. Схема малогоабаритного ВД со щелевидным выбросным соплом

дозаборника перекрыто, и самоходные испытания проводятся по обычной программе. Поскольку набегающий поток на стенде в отличие от судна равномерен, возможны определенные погрешности в кавитационных характеристиках, полученных на стенде. Поэтому в ответственных случаях проводятся самоходные испытания в кавитационном бассейне.

Для отработки движителей весьма быстроходных кораблей, когда числа кавитации недостижимы в бассейне был создан скоростной самоходный стенд, развивавший скорости до 70 уз и оборудованный необходимыми динамометрами, который позволял испытывать движители при натуральных скоростях.

Имеется ряд плодотворных идей по проектированию рабочих колес водометов традиционной конструкции, типа выпускаемых «KaMeWa». В частности, мы считаем, что есть определенные резервы за счет выбора различной конструкции рабочего колеса в зависимости от скорости хода.

В современных ВД обычно применяются три типа лопастных систем:

– осевая лопастная, имеющая постоянные по длине наружные диаметры импеллера, спрямляющего аппарата и их ступиц. Движение воды в пределах ло-

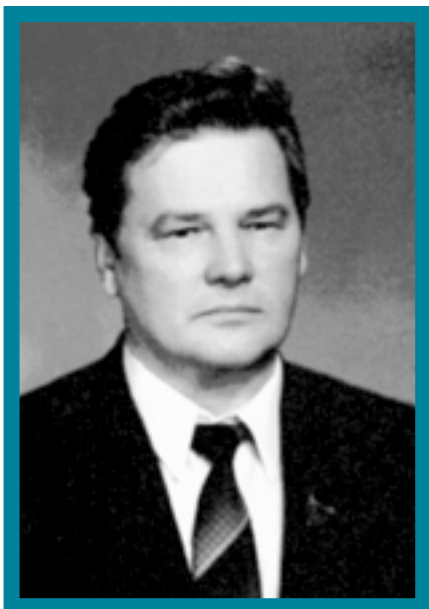
пастной системы обеспечивается по поверхностям соосных цилиндров;

– диагональная, имеющая переменные по длине наружные диаметры импеллера, спрямляющего аппарата и их ступиц; при этом движение воды в пределах импеллера осуществляется под наклоном линий тока от оси к периферии, в спрямляющем аппарате – с наклоном от периферии к оси;

– оседагональная, имеющая постоянный наружный диаметр импеллера и переменный по длине диаметр ступицы. Спрямляющий аппарат при этом может быть выполнен либо по осевой схеме, либо по диагональной, т.е. совмещенной с соплом, с целью снижения осевого размера ВД.

Для относительно тихоходных объектов обычно предпочтительнее осевые насосы, а для более быстроходных судов диагональные и оседагональные. Накопленный опыт и расчетные методы позволяют выбрать для каждого конкретного случая оптимальную насосную систему. В целом существующие экспериментальные установки в сочетании с расчетными методами и накопленным статистическим материалом позволяют спроектировать удовлетворяющий техническому заданию ВД для судов практически всех типов и назначений. ■

## К 70-ЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА Ю.Н. ПАВЛЮЧЕНКО



**Ю**рий Николаевич Павлюченко – доктор технических наук, академик Академии транспорта России, профессор, заведующий кафедрой Дальневосточного государственного технического университета (ДВГТУ), Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, Почетный член НТО судостроителей им. акад. А.Н. Крылова, автор более 220 научных публикаций по судостроению – родился в Москве 3 января 1935 г.

В 1958 г. он окончил кораблестроительный факультет Дальневосточного политехнического института им. В.В. Куйбышева (ДВПИ) по специальности «Судостроение и судоремонт», после чего в 1958–1964 гг. работал на Комсомольском-на-Амуре судостроительном заводе сначала мастером корпусных работ, затем инженером-конструктором КБ. В 1964–1967 гг. обучался в аспирантуре ДВПИ под руководством профессора Н.В. Барабанова. С 1967 г. по настоящее время преподает в ДВПИ – ДВГТУ.

В 1973 г. Юрию Николаевичу присвоено ученое звание доцента, в 1995 г. – профессора. В 1969 г. он защитил диссертацию «Исследование работы тронков наливных судов» с присуждением ученой степени кандидата технических наук, в 1993 г. – диссертацию «Комплексное решение проблем архитектурного проектирования судов» с присуждением ученой степени доктора транспорта Академии транспорта России, в 2002 г. – диссертацию «Развитие архитектуры судов» с присуждением ученой степени доктора технических наук.

Юрий Николаевич Павлюченко – автор первого учебного пособия по архитектурному проектированию судов и художественному конструированию в судостроении (1985), который до сих пор используется в учебном процессе вузов России и стран ближ-

него зарубежья. В 2001 г. была опубликована книга «Архитектура судов и кораблей», рекомендованная Министерством образования РФ в качестве учебного пособия для студентов вузов. Вопросы архитектурного проектирования и художественного конструирования в судостроении рассмотрены им в статьях «Дизайн первых подводных лодок» (2000), «Развитие архитектурно-конструктивных особенностей подводных лодок» (1999), «Декор подводных лодок России» (1999) и др.

Научно-организаторская деятельность Ю.Н. Павлюченко началась на судостроительном заводе в Комсомольске-на-Амуре, где в 1960–1964 гг. он возглавлял корпусную секцию НТО завода. При его непосредственном участии строились серия ледокольно-транспортных судов типа «Амгуэма», плавучие доки для транспортировки подводных лодок, выполнялся ремонт судов Амурского речного пароходства.

В период обучения в аспирантуре он был избран членом президиума Приморского краевого правления НТО СП, с 1967 по 2002 г. выполнял обязанности заместителя председателя секции проектирования и модернизации судов НТО, а с 1995 г. по настоящее время является председателем секции истории флота Приморского краевого правления НТО СП.

С 1972 по 1986 г. руководил хозяйственными работами, выполняемыми для Приморского морского пароходства, с 1973 г. – госбюджетными научно-исследовательскими работами, такими как «Исследование особенностей проектирования судов для Дальневосточного бассейна»; «Архитектура судов народов мира» и др.

В 2002 г. Ю.Н. Павлюченко избран председателем регионального научно-методического совета вузов Дальнего Востока по начертательной геометрии, инженерной и компьютерной графике; с 1977 г. – действительный член Географического общества СССР, Русского Географического общества, Общества изучения Амурского края, с 1996 г. – научный редактор «Записок ОИАК», руководитель постоянно действующего семинара по истории флота; с 1988 г. – член Союза дизайнеров СССР; с 1996 г. – зав. кафедрой графики ДВГТУ.

Научно-исследовательской работой Ю.Н. Павлюченко заинтересовался еще в студенческие годы. В 1957 г. две его работы – «Модель плавучего отсека корабля» и «История развития

танкеростроения» – были поощрены грамотами Министерства высшего образования СССР. В период работы на судостроительном заводе его исследования были тесно связаны с решением проблем ремонта и постройки судов. В 1968–1976 гг. выполнил ряд значительных экспериментальных исследований. К ним, например, относятся «Коррозия танков на наливных судах Дальневосточного морского бассейна» (1969), «Исследование надежности конструктивных узлов танкеров» (1972) и др.

Многочисленные исследования, нашедшие практическое применение, для Приморского морского пароходства выполнены им. Ряд работ отмечен грамотами и дипломами Центрального и Приморского краевого правления НТО СП им. акад. А.Н. Крылова.

С 1975 по 2004 г. он провел комплекс научных исследований по архитектурному проектированию судов.

С 1962 г. Юрий Николаевич читал курс лекций по теории подводных лодок на кораблестроительном факультете КнАПИ. С 1967 по 1981 г. преподает на кафедре проектирования судов ДВПИ, где читает лекции по курсам «Введение в специальность», «Устройство и проектирование судов», «Теория и устройство судов», «Архитектура судов», и др. Под его руководством выполнено и защищено более 120 дипломных проектов по кораблестроению.

С 1981 г. работает на кафедре графики ДВПИ–ДВГТУ, где читает курсы «Начертательная геометрия» и «Инженерная графика». С 1995 г. по настоящее время руководит работой аспирантов и соискателей по специальности «История науки и техники» (технические науки) по проблемам флота.

Ю.Н. Павлюченко – автор (в ряде случаев – соавтор) целого ряда учебных пособий для студентов вузов, в том числе «Основы художественного конструирования судов» (1985), «Архитектура судов и кораблей» (1992, 2001); «Курс начертательной геометрии с инженерными приложениями к морской практике» (2000) и др.

*Многочисленные ученики и коллеги поздравляют Юрия Николаевича Павлюченко с 70-летием и желают ему доброго здоровья и новых достижений в деле развития кораблестроительной науки.*

**ЖУРНАЛ «МОРСКОЙ ВЕСТНИК»  
ПРИСОЕДИНЯЕТСЯ К ЭТИМ  
ПОЗДРАВЛЕНИЯМ И ЖЕЛАЕТ  
ЮБИЛЯРУ БЛАГОПОЛУЧИЯ И  
ТВОРЧЕСКОГО ДОЛГОЛЕТИЯ.■**



**К**авитационные и гидродинамические трубы сохраняют свое значение и, по-видимому, сохраняют его в будущем как многоцелевые универсальные экспериментальные установки, при изучении комплексных гидродинамических проблем, таких, например, как взаимодействие движителя и корпуса судна в широком диапазоне чисел кавитации. Рассмотрение такой комплексной проблемы включает в себя широкий спектр задач, от традиционно решаемых в процессе проектирования на этих и на других установках (гидродинамического взаимодействия гребного винта с корпусом судна, кавитации изолированного движителя и работающего в неоднородном потоке за корпусом) до специальных задач, которым уделяется все большее внимание в настоящее время (шумоизлучение, нестационарные силы и давления).

Снижение шума и вибраций за последние годы стало одной из приоритетных целей не только для кораблей ВМФ, но и для океанографических и сейсмических судов, а также круизных лайнеров. Круг задач, которые в настоящее время решаются в кавитационных и гидродинамических трубах и для исследования которых такого рода установки являются уникальным экспериментальным средством, существенно расширился, в связи с чем к этим установкам предъявляются новые требования.

До относительно недавнего времени проведение акустических измерений в кавитационных трубах относилось только к исследованию источников шума, имеющих кавитационную природу. При этом, как правило, для выделения сигнала над уровнем собственных помех установки достаточным являлось отсутствие кавитации элементов самого проточного канала и импеллерного насоса при режимах испытаний, соответствующих кавитации испытываемого объекта в рабочем участке.

В настоящее время наряду с источниками шума кавитационной природы в кавитационных и гидродинамических трубах проводятся исследования источников некавитационного шума, уровни гидродинамического шума которых в целом значительно ниже, чем уровни кавитационного шума. В связи с этим существенно ужесточились и требования к акустическим качествам установки. При проектировании и строительстве кавитационных труб ранней постройки специальные комплексные меры по снижению шума не принимались, и гидродинамическое проектирование проточного канала трубы и импеллерного насоса выполнялось без учета требований к фоновому шуму. Поэтому большинство установок ста-

## ФОНОВЫЙ ШУМ В РАБОЧЕМ УЧАСТКЕ КАВИТАЦИОННОЙ ТРУБЫ.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВКЛАДА РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ, ПРОГНОЗ ОЖИДАЕМЫХ УРОВНЕЙ

*В.О. Борусевич, науч. сотрудник, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*

рой постройки не в полной мере отвечают требованиям по фоновому шуму в рабочем участке. Однако даже и в этих установках можно проводить измерения гидродинамического шума в случае достаточно большого полезного сигнала. Применительно к гидродинамическому шуму движителей, являющемуся основным предметом модельных экспериментальных исследований, это можно обеспечить, увеличивая диаметр испытываемой модели и частоту вращения, а также сокращая расстояние от испытываемой модели до приемника акустического сигнала. Перечисленные меры взаимно противоречивы и не могут применяться комплексно: для получения корректных результатов измерений приемник сигнала с увеличением размеров источника должен быть расположен на большем расстоянии, кроме того, увеличение размеров модели винта исключает испытания в попутном потоке за корпусом судна, поскольку последний в этом случае становится неприемлемо большим по сравнению с размерами рабочего участка.

Задачей настоящей работы является выявление основных источников, определяющих фоновый шум в рабочем участке кавитационной трубы, и определение необходимых мер при проектировании для обеспечения проведения испытаний с целью измерения гидродинамического шума моделей движителей. До недавнего времени информация о шумности установок с обращенным движением была очень ограниченной и, как правило, приводилась в относительной форме, характеризующей соотношение полезного сигнала и помехи без указания абсолютных уровней фоновых значе-

ний. Одновременно с этим какой-либо метод прогнозирования уровней фонового шума вновь строящейся установки отсутствовал. Дело ограничивалось, как правило, применением ряда конструктивных мероприятий без определения эффективности и необходимости каждого из них в отдельности, а также без выполнения оценок шумности отдельных элементов установки. Это приводило к тому, что весь перечень мероприятий оказывался либо избыточным, поскольку требования достигаются и без выполнения ряда запланированных мер, либо недостаточным, поскольку любые запланированные меры и дополнительные меры в рамках уже существующей общей конструкции, не позволяют достичь требований. Такие примеры приводятся ниже в рамках выполняемого анализа.

В работе [1] была предпринята попытка прогнозирования уровней фонового шума для проектируемой в тот период установки ЛСС Испытательного центра CDNSWC в Мемфисе. На рис.1 представлены требования, поставленные проектанту для скорости потока в рабочем участке  $V_0 = 15$  м/с при атмосферном давлении. На этом же рисунке показаны полученные по результатам модельных испытаний импеллера уровни прогнозируемого кавитационного шума импеллера в рабочем участке данной трубы. Как видно из приведенных данных, появление кромочной кавитации на лопастях импеллера приводит к значительному превышению требований и уровням шума в рабочем участке. Однако, поскольку кавитация кромок лопастей импеллера возникает при более низких в сравнении с требованиями дав-

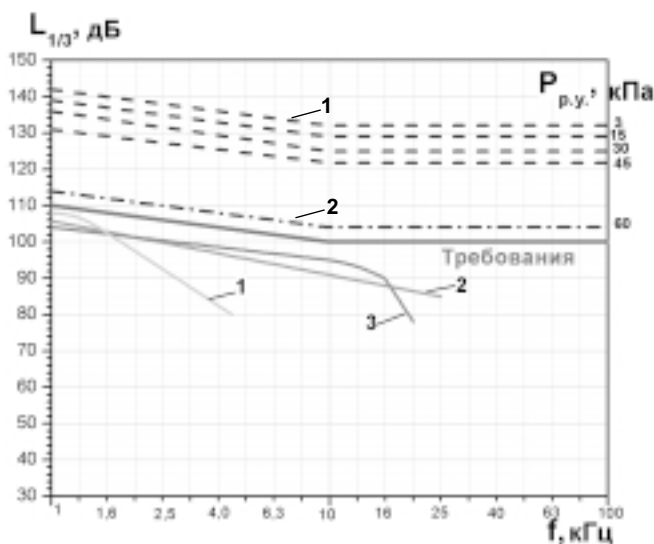


Рис.1. Требования и прогнозируемые уровни фонового шума в рабочем участке установки ЛСС при скорости потока в рабочем участке 15 м/с:

Кавитационный шум: 1 – кавитация импеллера; 2 – щелевая кавитация.

Гидродинамический шум: 1 – шум поворотных лопаток; 2 – кромочный шум импеллера; 3 – турбулентный шум ПС на стенках рабочего участка

лениях, она не влияет на выполнение требований и в равной степени не повлияет на проведение измерений гидродинамического шума моделей в рабочем участке, выполняемых при избыточном либо атмосферном давлении. Появление щелевой кавитации импеллерного насоса при давлении 0,6 ата приводит к относительно небольшому превышению требований. При атмосферном давлении этот источник шума также исключен.

Таким образом, кавитация импеллера отсутствует, и доминирующий источник помехи – шум кавитационной природы самой установки – не влияет на выполнение требований.

Прогноз шума источников некавитационной природы выполнен в [2]. Приведенные на рис.1 данные показывают, что потенциальными источниками шума некавитационной природы для данной установки являются турбулентный шум обтекания стенок рабочего участка, гидродинамический шум обтекания поворотных лопаток и кромочный шум импеллера. Исключая ограниченную область частот в районе граничной частоты измерений данной установки, доминирующим источником шума является турбулентный шум обтекания

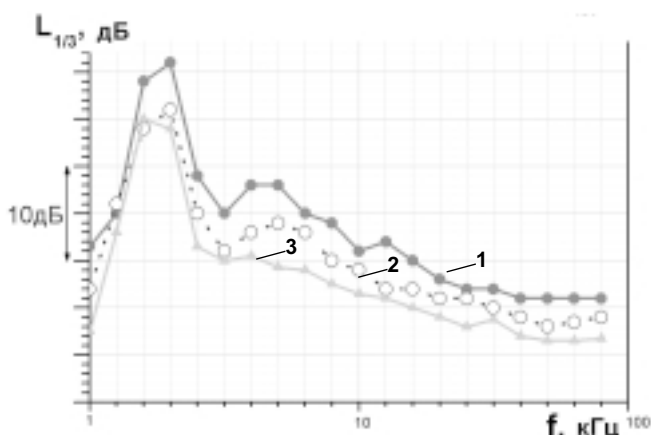


Рис.2. Результаты измерений уровней гидродинамического шума модели гребного винта в рабочем участке ТИИЦ (диаметр модели  $D = 350$  мм).

1 – расстояние от источника до приемника 0,67 м; 2 – расстояние от источника до приемника 1,23 м (-5,3 дБ в свободном поле); 3 – расстояние от источника до приемника 2,16 м (-10,2 дБ в свободном поле)

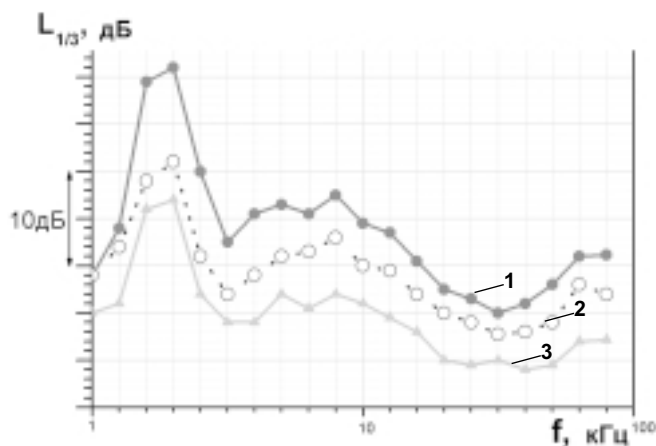


Рис.3. Результаты измерений уровней гидродинамического шума модели гребного винта в рабочем участке ТИИЦ (диаметр модели  $D = 275$  мм).

1 – расстояние от источника до приемника 0,59 м; 2 – расстояние от источника до приемника 1,45 м (-8,0 дБ в свободном поле); 3 – расстояние от источника до приемника 3,2 м (-14,7 дБ в свободном поле)

стенок рабочего участка. Кромочный шум импеллера ниже других возможных источников, а шум обтекания лопаток может проявиться лишь вблизи граничной частоты измерений. Приведенный ниже анализ подтверждает, что такое определение относительного вклада различных источников можно считать относящимся не только к данной установке, но и в целом к универсальным невинтовым кавитационным трубам, имеющим достаточно большие размеры и протяженный диффузор за рабочим участком до поворотного колена. Однако при этом абсолютные уровни фонового шума, определяемые рекомендуемыми в работе [2] методами, отличаются в значительной мере от фактических.

Учитывая недостаточную надежность приведенного прогноза шумности, оценим на основании анализа имеющиеся фактические данные ряда кавитационных труб, а также специально проведенные испытания в трубах ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, в трубе индийского испытательного центра (ТИИЦ) и в трубе Французского испытательного центра (ГТН), используя при этом общие принципы и данные, применяемые при анализе гидродинамического шума гребных винтов.

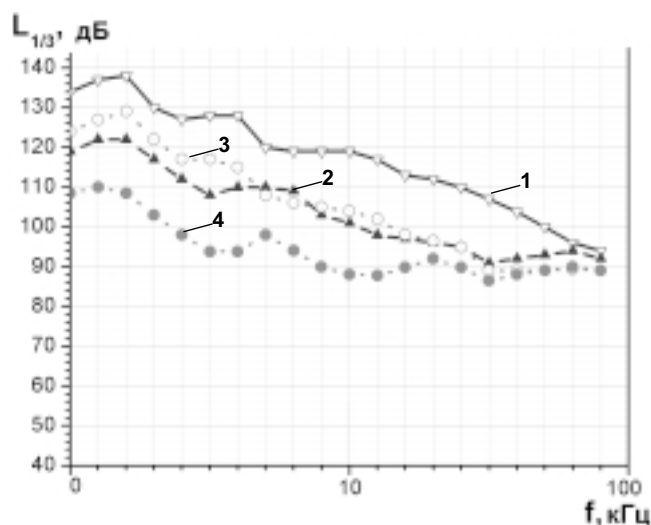


Рис.4. Сопоставление уровней фонового шума в двух рабочих участках ГТН при равных скоростях течения в обратном канале.

1 – STS  $V_0 = 18$  м/с; 2 – LTS  $V_0 = 10$  м/с; 3 – STS  $V_0 = 12$  м/с; 4 – LTS  $V_0 = 6$  м/с

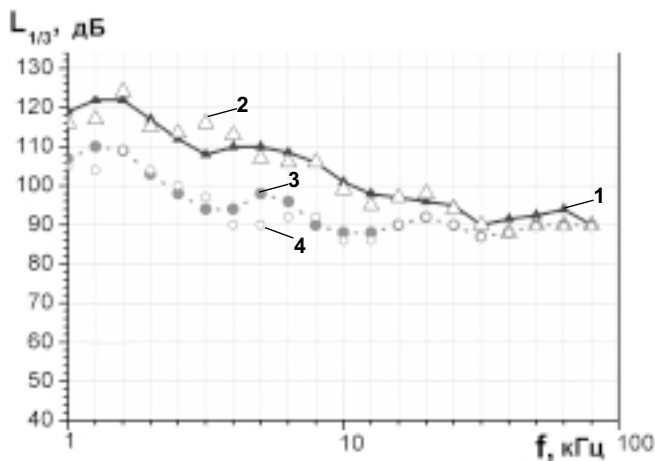


Рис.5. Сопоставление уровней фонового шума в двух рабочих участках GTN при равных скоростях течения в рабочем участке.

1 – STС  $V_0 = 10$  м/с; 2 – LTS  $V_0 = 10$  м/с; 3 – STС  $V_0 = 6$  м/с; 4 – LTS  $V_0 = 6$  м/с

При проектировании ТИИЦ и в процессе ее эксплуатации был выполнен ряд экспериментов, результаты которых могут быть полезны для решения сформулированной задачи. В канале имеются два элемента, помимо самого рабочего участка, гидродинамический шум которых мог бы повлиять на фоновый шум в рабочем участке. Это поворотные лопатки в составе поворотных колен и импеллер. Для оценки их возможного вклада крайне важно представлять характер распространения шума внутри канала трубы, т.е. его изменение от расстояния. Из-за ограниченности канала трубы на всем протяжении от места расположения потенциального источника шума до места расположения приемника акустического сигнала в рабочем участке кажется необоснованным ожидать, что закон распространения может быть близким к сферическому, характерному для источника в неограниченном пространстве. В материалах систематических испытаний в трубе GTN [3] указано, что характер распространения сигнала близок к закону распространения в свободном поле. Этот очень важный для анализа факт требует проверки, которая была сделана экспериментально в ТИИЦ. На рис. 2 и 3 представлены результаты изменения сигнала от расстояния для двух испы-

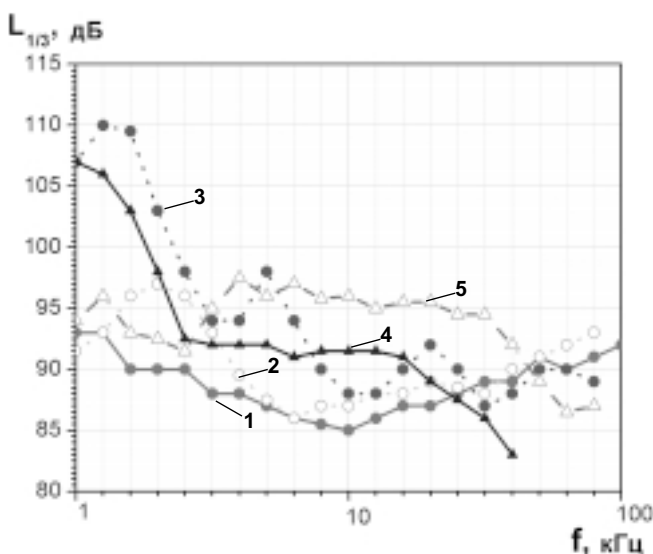


Рис.6. Уровни фонового шума в рабочих участках различных установок при скорости потока  $V_0 = 6$  м/с. 1 – НУКАТ (Германия); 2 – ТИИЦ (Индия); 3 – GTN (Франция); 4 – LCT (США); 5 – CSSRC (Китай)

танных моделей гребных винтов. Благодаря наличию протяженной акустической камеры под рабочим участком такой анализ является возможным.

В первом случае расположение приемников таково, что в свободном поле убывание сигнала от первой до последней точки должно составлять 10 дБ, во втором случае крайняя точка еще более удалена и убывание должно быть 15 дБ. Результаты измерений показали, что и в том, и в другом случае убывание менее интенсивно, и различие составляет 5 дБ. Такой же результат получается при прямом эксперименте, когда источник и приемник были помещены сначала в звукозаглушенный бассейн ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, а затем на том же расстоянии в Кавитационную трубу ТИИЦ. Аналогично уровни в трубе примерно на 5 дБ выше. Как и следовало ожидать, закон распространения в канале не совпадает с таковым для свободного поля, прямое распространение сигнала в направлении источник-приемник является доминирующим, а отраженные многократно от стенок сигналы значительно затухают на пути распространения. Данное заключение коррелируется с выводом, сделанным применительно к установке GTN, и может рассматриваться как достаточно общее.

Сопоставим полученный результат с уровнями гидродинамического кромочного шума испытываемой модели и импеллера в рабочем участке. Положим, что нормированный спектр, представляющий собой спектр излучения, приведенный к единичному диаметру и единичной частоте вращения, характерный для модели, может быть отнесен и к импеллеру. Такое предположение должно приводить к ошибке – «переоценке» шума импеллера, лопасти которого в действительности имеют большую жесткость по сравнению с гребными винтами ввиду большего относительного диаметра ступицы. Используя зависимость кромочного шума от диаметра и частоты вращения  $n^5 D^7$ , можно получить, что при всех характерных сочетаниях этих параметров в рассматриваемых установках на поступи модели винта  $J \approx 1$  (определяющей соотношение  $n_m$  и  $n_u$ ) из-за относительной удаленности сигнал импеллера будет примерно на 25 дБ ниже, если источник и приемник (испытываемая модель винта и измерительный гидрофон) находятся на расстоянии, равном поперечному размеру рабочего участка. При этом учтен сделанный выше вывод относительно характера распространения акустического сигнала внутри канала трубы, соответствующий убыванию уровней шума источника в квадратичной зависимости от расстояния.

Аналогичным образом рассуждая в отношении поворотных лопаток (полагая размах эквивалентным диаметру) можно прийти к выводу, что и лопатки не могут влиять на измерение шума модели винта из-за малых скоростей и достаточной удаленности. Если элементы проточного канала кавитационной трубы спроектированы правильно и их кавитация при измерениях гидродинамического шума испытываемых моделей исключена, то только турбулентный шум пограничного слоя на стенках рабочего участка может быть источником, создающим помехи, препятствующие измерению шума модели винта в рабочем участке.

Подтверждением сделанных выводов, общих для рассматриваемого класса установок, является приведенный ниже анализ результатов измерений фонового шума в установке GTN. Уникальность данной установки заключается в том, что она имеет два рабочих участка, соединенных с единым обратным каналом. Поджатие, определяющее соотношение площади поперечного сечения рабочего участка к площади поперечного сечения обратного канала, для разных участков отличается примерно в 2 раза, что дает возможность сопоставить уровни шума при равной скорости потока в рабочем участке, и вдвое отличающейся для импеллера, лопаток и всех других элементов обратного канала. Точно также можно делать сопоставление при равной скорости

на элементах обратного канала, но отличной в рабочем участке. Приведенные на рис.4 и 5 результаты с очевидностью свидетельствуют в пользу уже сказанного: только обтекание рабочего участка определяет фоновый шум.

Факторами, которые могут повлиять на образование и развитие турбулентного пограничного слоя на стенках рабочего участка, является степень турбулентности в потоке и шероховатость стенок рабочего участка. При возрастании этих параметров происходит более ранний переход от ламинарного к турбулентному течению в пограничном слое на стенках. Пользуясь известными для продольного обтекания плоской пластины данными [4], можно заключить, что при степени турбулентности внешнего потока менее 0,4%, зависимость критического числа Рейнольдса перехода к турбулентному течению в пограничном слое становится высокоградиентной и изменение  $\epsilon$  от 0,5% до 0,15% приводит к более чем двукратному изменению числа Рейнольдса перехода. В [4] приведены также данные о влиянии распределенной песочной шероховатости, из кото-

рых следует, что при  $\frac{U^* k_s}{\nu} \leq 100$  шероховатость поверх-

ности не влияет на течение в пограничном слое. Для диапазона скоростей  $U^* \geq 5$  м/с указанное условие приводит к необходимости обеспечить чистоту обработки поверхности  $R_z = 20$  мкм.

Рассматривая относящиеся к одному классу невинтовых кавитационных труб установки, характеризующиеся (рис.6) низкими фоновыми уровнями шума в рабочем участке GTH (Франция), CSSRC (Китай), LCC (США), НУКАТ (Германия), ТИИЦ (Индия) можно увидеть, что GTH и CSSRC имеют относительно более высокие уровни, при этом и степень турбулентности в ядре потока рабочих участков этих установок относительно высока (0,4 – 0,6%) в сравнении с другими перечисленными. Наилучшими качествами отличается НУКАТ, где степень турбулентности в потоке рабочего участка составила примерно 0,15% и ТИИЦ – около 0,25%.

Данные о шероховатости стенок не приведены в описании установок и известны точно только для ТИИЦ:  $R_z = 60$  мкм. Однако известна и величина гидравлических потерь канала в целом, и расчетные значения для отдельных участков НУКАТ, откуда нетрудно установить, что шероховатость стенок рабочего участка не превышала 20 – 30 мкм. Отличия по обоим параметрам ( $R_z$  и  $\epsilon$ ), по-видимому, и опреде-

ляют несколько худшие, которые тем не менее, хотя и отвечающие высоким требованиям, уровни для ТИИЦ.

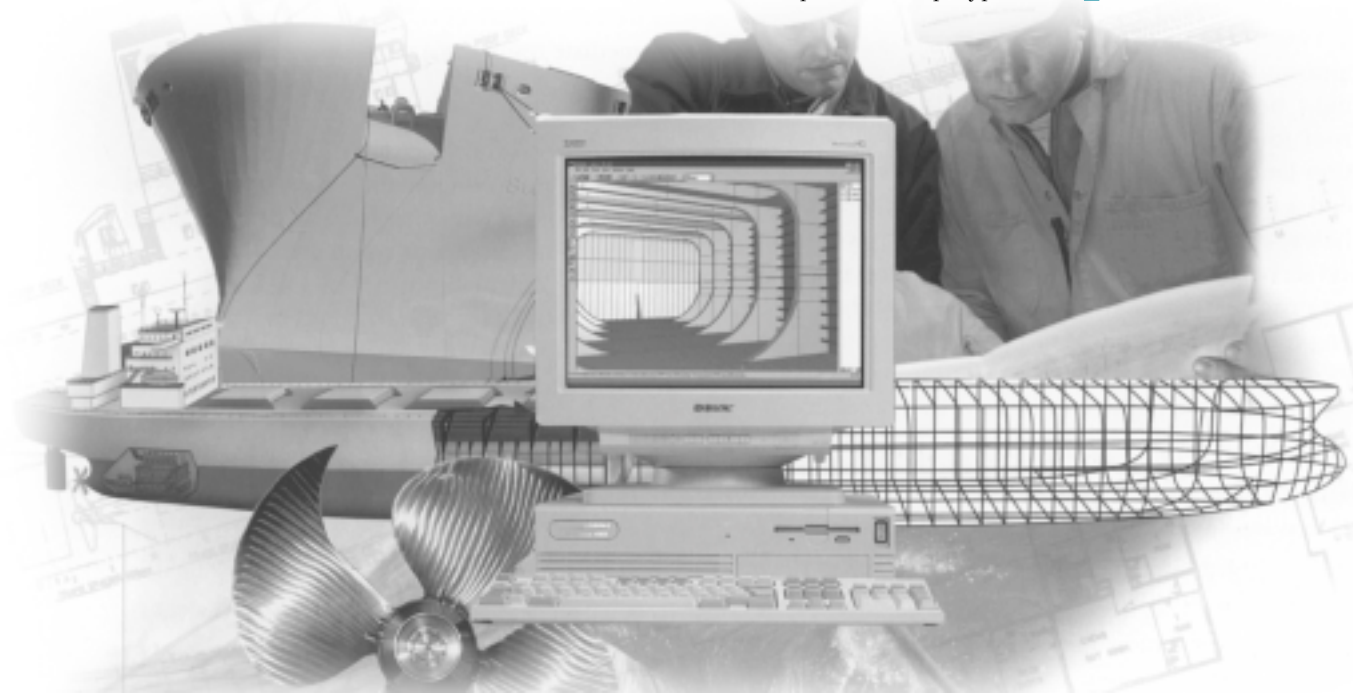
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отсутствии кавитации импеллера и других элементов кавитационной трубы ожидаемые уровни помех в рабочем участке не превышают в интересующем диапазоне частот ~ 90 дБ на скорости потока  $V_0 = 6$  м/с при условии, что приняты меры к минимизации степени турбулентности в потоке  $\epsilon = 0,1 - 0,2\%$  и шероховатость стенок не превышает 20 мкм.

При этом предполагается, что осуществлен перечень мероприятий, исключаяющий доминирующую роль механических помех от привода импеллерного насоса: применение подшипников скольжения в валовой линии насоса, виброизоляция двигателя импеллера от корпуса установки как по линии вала, так и по опорным конструкциям. Одновременно, можно утверждать, что применение таких мер, как установка акустических решеток в вертикальных каналах (НУКАТ), выбор диаметра импеллера отличным от оптимального по кавитации, облицовка лопаток вибропоглощающим материалом (LCC), засыпка котлована вокруг нижней части канала трубы вибропоглощающим материалом – в целом является нецелесообразным, направленным на борьбу с недоминирующим источником, либо даже вредным (как установка акустических решеток), поскольку последнее увеличивает гидравлические потери. ■

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ettler R., Wilson M.B. The Large Cavitation Channel // 23-rd American Towing Tank Conference, New-Orlean, Louisiana, 1992, June 11-12, Preprints, p.193-202.
2. Greeley D.S., Abbot P.A., Brown N.A., Rothblum R.S. Water Tunnel Background Noise Models // ASME International Symposium on Cavitation Research Facilities and Techniques-1987, FED-Vol.57, Boston, Dec.1987, p.91-97.
3. D. Frechou, C. Dugue, L. Briancon-Marjollet, P. Fournier, M. Darquier, L. Descotte, L. Merle. Marine Propulsor Noise Investigations in the Hydroacoustic Water Tunnel "GTH" // 23-rd Symposium on Marine Hydrodynamics, Val-de-Rue, Sept.2000.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.- М.: Изд-во иностранной литературы, 1956. ■



Определение характеристик движения судна на волнении является основным и важнейшим этапом при оценке его мореходности. Возросшие с развитием теории корабля требования к точности расчетов характеристик мореходности кораблей и судов и надежной оценке безопасности судна в штормовых условиях приводят к необходимости уточнения дифференциальных уравнений, описывающих поведение судна на взволнованной поверхности, и переходу от линейных подходов и методов исследования к более точным методам нелинейной теории качки.

Построение методов и алгоритмов расчета нелинейной качки судов на волнении требует, в свою очередь, уточнения структуры гидродинамических сил (ГДС) за счет учета таких типов нелинейностей, как наличие компонентов высшего порядка малости в потенциале скорости движения жидкости и в интеграле Лагранжа–Коши для давления. В общем случае данная задача является трехмерной. Но поскольку решение пространственной нелинейной потенциальной гидродинамической задачи теории качки связано со значительными вычислительными трудностями, обычно используется метод плоских сечений, который сводит решение трехмерной задачи к плоской гидродинамической задаче о поперечной качке контура на регулярном волнении с учетом нелинейных граничных условий на поверхности контура и на свободной поверхности жидкости, отражающих гидродинамическую взаимосвязь между набегающим, диффрагированным и вызванным отдельными видами колебаний волнением.

Нелинейные задачи о колебаниях плоских контуров были рассмотрены в ряде работ зарубежных авторов [1, 2, 3]. В большинстве из них решение строилось методом интегральных уравнений, применение которого зачастую приводит к нерегулярным, скачкообразным, результатам при вычислении нелинейных горизонтальных сил и моментов.

В настоящей работе рассматривается метод расчета нелинейной поперечной качки судна, основанный на применении методов малого параметра, теории функций комплексного переменного, метода плоских сечений и свободный от перечисленных недостатков.

Определение нелинейных ГДС основано на решении плоской нелинейной задачи о колебаниях контура на регулярном волнении, для реализации которого вводятся четыре малых параметра, характеризующих относительные амплитуды волнового движения жидкости, поперечно-горизонтальных (ПГК), вертикальных (ВК) и бортовых колебаний (БК) контура:

$$\varepsilon_7 = \frac{a_w}{b}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\eta^{(1)}}{b}; \quad \varepsilon_3 = \frac{\zeta^{(1)}}{b}; \quad \varepsilon_4 = \frac{\theta^{(1)}}{1rad}.$$

Тогда потенциал скорости движения жидкости с точностью до второго порядка малости можно представить в виде следующей суперпозиции:

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, t, \varepsilon_i) = \Phi^{(1)} + \Phi^{(2)} = & \{\varepsilon_7[\varphi_0(x, y) + \varphi_7^{(1)}(x, y)] + \\ & + \varepsilon_2\varphi_2^{(1)} + \varepsilon_3\varphi_3^{(1)} + \varepsilon_4\varphi_4^{(1)}\}e^{-j\omega t} + \{\varepsilon_7^2[\varphi_7^{(2)} + \varphi_{0+7}^{(2)}] + \\ & + \varepsilon_2^2\varphi_{22}^{(2)} + \varepsilon_3^2\varphi_{33}^{(2)} + \varepsilon_4^2\varphi_{44}^{(2)} + \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_7 \cdot \varphi_{2,0+7}^{(2)} + \varepsilon_3\varepsilon_7\varphi_{3,0+7}^{(2)} + \\ & + \varepsilon_4\varepsilon_7\varphi_{4,0+7}^{(2)} + \varepsilon_2\varepsilon_3\varphi_{23}^{(2)} + \varepsilon_2\varepsilon_4\varphi_{24}^{(2)} + \varepsilon_3\varepsilon_4\varphi_{34}^{(2)}\}e^{-j2\omega t}. \end{aligned} \quad (1)$$

Суммарные нелинейные силы и момент второго порядка, действующие со стороны жидкости на колеблющийся

# О ВЛИЯНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИЛ ВТОРОГО ПОРЯДКА НА ЗНАЧЕНИЯ АМПЛИТУД ПОПЕРЕЧНОЙ КАЧКИ КОРАБЛЯ

**В.Ю. Семенова**, канд. техн. наук,  
СПбГМТУ

контур, с учетом введенных малых параметров и выражения (1), будут иметь вид

$$\begin{aligned} F_{H\Sigma}^{(2)} = & F_{H22}^{(2)} + F_{H44}^{(2)} + F_{H23}^{(2)} + F_{H34}^{(2)} + \\ & + F_{H77}^{(2)} + F_{H2,0+7}^{(2)} + F_{H3,0+7}^{(2)} + F_{H4,0+7}^{(2)}; \\ F_{V\Sigma}^{(2)} = & F_{V22}^{(2)} + F_{V44}^{(2)} + F_{V23}^{(2)} + F_{V34}^{(2)} + \\ & + F_{V77}^{(2)} + F_{V2,0+7}^{(2)} + F_{V3,0+7}^{(2)} + F_{V4,0+7}^{(2)}; \\ M_{X\Sigma}^{(2)} = & M_{X22}^{(2)} + M_{X44}^{(2)} + M_{X23}^{(2)} + M_{X34}^{(2)} + \\ & + M_{X77}^{(2)} + M_{X2,0+7}^{(2)} + M_{X3,0+7}^{(2)} + M_{X4,0+7}^{(2)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где индексами 0, 2, 3, 4, 7 обозначены набегающее волнение, поперечно-горизонтальные, вертикальные, бортовые колебания и диффрагированное волнение.

Первые четыре составляющие в выражениях (2) представляют нелинейные инерционно-демпфирующие силы и моменты, обусловленные изолированными ПГК и БК на тихой воде, а также взаимодействием ПГК и ВК и ВК и БК. Последние четыре составляющие относятся к возмущающим силам и моментам, обусловленным взаимодействием набегающего, диффрагированного и вызванного поперечно-горизонтальными, вертикальными и бортовыми колебаниями волнения. Для определения всех перечисленных составляющих нелинейных ГДС необходимо решить 10 нелинейных граничных задач второго порядка и найти соответствующие потенциалы второго порядка, входящие в (1). Решение каждой из этих задач реализуется с учетом нелинейных граничных условий на свободной поверхности жидкости и на контуре [5, 6, 7] и основано на представлении соответствующего потенциала второго порядка в виде суперпозиции двух функций  $\Phi^{(2)} = G + W$ , (3)

первая из которых удовлетворяет граничному условию на свободной поверхности, а вторая – граничному условию на контуре.

Задача определения функций  $W$  основана на использовании решения Вехаузена–Лайтона [4], а функций  $G$  – на методе гидродинамических особенностей [5, 6, 7].

В соответствии с разложением (1), гидродинамическое давление на поверхности контура будет определяться следующим образом:

$$\begin{aligned} p(x, y, t) = & p^{(1)} + p^{(2)} = -\rho\{\varepsilon_3 g \zeta(t) + \varepsilon_4 g x \theta(t) + \\ & + \Phi_t^{(1)}(x, y, t) - 0.5\varepsilon_4^2 g y \theta^2(t) + (\varepsilon_2 \eta(t) - \varepsilon_4 y \theta(t))\Phi_{ix}^{(1)} + \\ & + (\varepsilon_3 \zeta(t) + \varepsilon_4 x \theta(t))\Phi_{iy}^{(1)} + \Phi_t^{(2)} + 0.5(\Phi_x^{(1)2} + \Phi_y^{(1)2})\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Каждая из составляющих нелинейных сил и момента, входящих в (2) определяется посредством интегрирования выражения (4) и последующего группирования составляющих, пропорциональных одинаковым степеням малых параметров.

На основании разработанного метода было составлено 10 компьютерных программ, реализующих решение задачи о нелинейной качке контура и проведены тестовые расчеты различных категорий сил для различных типов контуров. Проведенное сравнение полученных результатов с найденными экспериментальными данными и расчетами других авторов показали полную работоспособность и пригодность данного комплекса программ [5, 6, 7]. Разбив судно в зависимости от желаемой точности на 10 или 20 шпанций и определив для каждого его шпангоутного сечения с помощью данного комплекса программ все нелинейные силы и моменты, можно найти на основании метода плоских сечений нелинейные ГДС, действующие на все судно в целом.

Система дифференциальных уравнений поперечной качки судна с учетом нелинейных сил второго порядка будет иметь вид

$$\begin{aligned} (M + \lambda_{22})\ddot{\eta} + \mu_{22}\dot{\eta} + \lambda_{24}\ddot{\theta} + \mu_{24}\dot{\theta} &= \\ = F_H^{(1)} e^{-j\omega t} + F_H^{(2)} e^{-j2\omega t}; \\ (M + \lambda_{33})\ddot{\zeta} + \mu_{33}\dot{\zeta} + \rho g S \zeta &= \\ = F_V^{(1)} e^{-j\omega t} + F_V^{(2)} e^{-j2\omega t}; \\ (J_{xx} + \lambda_{44})\ddot{\theta} + \mu_{44}\dot{\theta} + \lambda_{42}\ddot{\eta} + \mu_{42}\dot{\eta} + Mgh_0\theta &= \\ = M_X^{(1)} e^{-j\omega t} + M_X^{(2)} e^{-j2\omega t}. \end{aligned} \quad (5)$$

Ее решение в соответствии с правой частью имеет бигармоническую форму

$$\begin{aligned} \eta(t) &= \eta^{(1)} \sin(\omega t + \delta_\eta^{(1)}) + \varepsilon_2 \eta^{(2)} \sin(2\omega t + \delta_\eta^{(2)}); \\ \zeta(t) &= \zeta^{(1)} \sin(\omega t + \delta_\zeta^{(1)}) + \varepsilon_3 \zeta^{(2)} \sin(2\omega t + \delta_\zeta^{(2)}); \\ \theta(t) &= \theta^{(1)} \sin(\omega t + \delta_\theta^{(1)}) + \varepsilon_4 \theta^{(2)} \sin(2\omega t + \delta_\theta^{(2)}). \end{aligned} \quad (6)$$

Дважды дифференцируя выражения (6), подставляя найденные производные в систему (5) и приравнявая коэффициенты при соответствующих функциях времени, получаем две системы уравнений относительно неизвестных амплитуд первых  $\eta^{(1)}$ ,  $\zeta^{(1)}$ ,  $\theta^{(1)}$  и вторых гармоник  $\eta^{(2)}$ ,  $\zeta^{(2)}$ ,  $\theta^{(2)}$ , соответственно. Следует отметить, что вторая из полученных систем вследствие зависимости суммарных нелинейных сил и момента от амплитуд  $\eta^{(1)}$ ,  $\zeta^{(1)}$ ,  $\theta^{(1)}$  может быть решена только после решения первой системы.

На основании вышеизложенного материала автором были проведены расчеты поперечной качки судов различных типов. На рис.3 и 4 представлены результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) первых  $\eta^{(1)}$ ,  $\zeta^{(1)}$ ,  $\theta^{(1)}$  и вторых гармоник  $\eta^{(2)}$ ,  $\zeta^{(2)}$ ,  $\theta^{(2)}$  гармоник и суммарные АЧХ бортовой, вертикальной и поперечно-горизонтальной качки навалочного судна «Капитан Гусев» (рис.1) и теплохода «Любовь Орлова» (рис.2), основные характеристики которых приведены в табл.1.



Рис.1. Навалочное судно



Рис.2. Теплоход

Таблица 1

### Основные характеристики судов

Судно	L, м	B, м	T, м	$\delta$	$\alpha$	Zg, м	h <sub>о</sub> , м
«Капитан Гусев»	111,45	16,4	4,8	0,798	0,896	4,19	3,09
«Любовь Орлова»	90	16,2	4,65	0,598	0,732	5,76	1,143

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие основные выводы:

1. Для АЧХ бортовой и вертикальной качки, вычисленных с учетом нелинейных сил в отличие от АЧХ, полученных по линейной теории, характерно наличие ультрагармонических резонансов. Данные резонансы имеют место в области частот волнения, в два раза меньших собственных частот вертикальной и бортовой качки соответственно (рис.3, а, б; рис.4, а, б) и обусловлены наличием бигармонических сил и моментов второго порядка в правой части системы (5). Влияние нелинейных факторов в зоне ультрагармонического резонансного режима может достигать более 50% в случае бортовой качки и 40% в случае вертикальной.

2. В случае бортовой качки влияние нелинейности существенно увеличивается при уменьшении метацентрической высоты. Это связано с уменьшением доли линейных составляющих в суммарном силовом воздействии на судно.

3. АЧХ поперечно-горизонтальной качки не имеют никаких резонансных режимов (рис.3, в; рис.4, в), что объясняется отсутствием восстанавливающих сил. Влияние нелинейных факторов для данного вида качки проявляется в низкочастотной области и может достигать 10–15%.

4. Влияние нелинейных ГДС второго порядка на кинематические характеристики поперечной качки увеличивается при увеличении отношения  $B/T$  судна. Так, для теплохода «Любовь Орлова» ( $B/T = 3,5$ ) наблюдается наибольшее проявление нелинейности в области ультрагармонических резонансов бортовой и вертикальной качки.

5. Увеличение скорости хода приводит к уменьшению влияния нелинейных факторов в случае бортовой качки из-за увеличения демпфирования, а также к уменьшению АЧХ вторых гармоник вертикальной качки.

Отдельно было проведено исследование влияния потенциалов второго порядка на значения кинематических характеристик качки. Для этого все составляющие нелинейных гидродинамических сил и моментов рассчитывались без учета соответствующих потенциалов второго порядка. Рассчитанные при указанном допущении АЧХ для навалочного судна «Капитан Гусев» представлены на рис.4. Из представленных результатов видно, что отсутствие решения нелинейных задач второго порядка приводит к резкому уменьшению безразмерных амплитуд вертикальной и бортовой качки  $\frac{\zeta_\Sigma}{a_w}$  и  $\frac{\theta_\Sigma}{\alpha}$  в области ультрагармонических резонансных режимов и некоторому незначительному увеличению в области основного. В случае поперечно-горизонтальной качки влияние нелинейных факторов вообще стремится к нулю (рис.4, в).

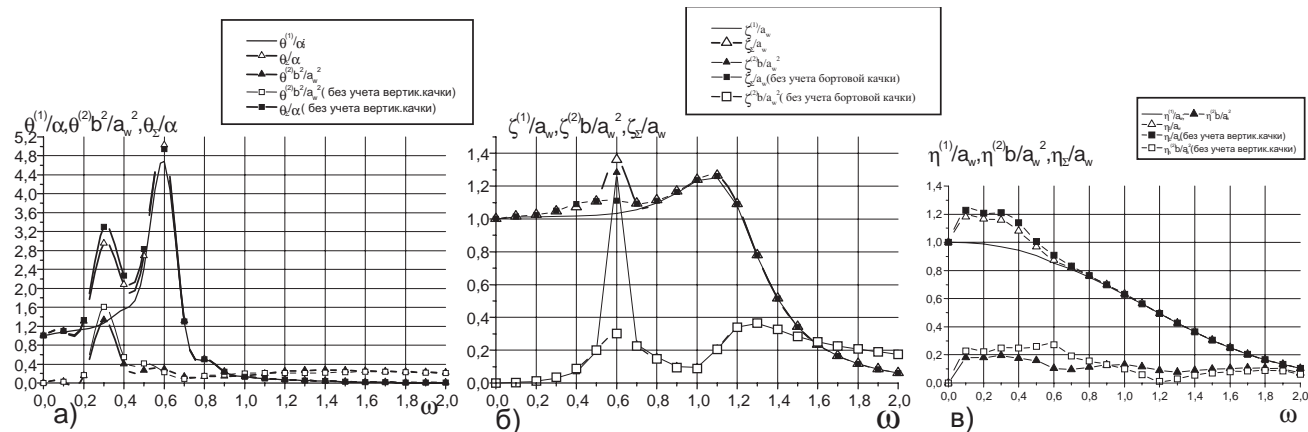


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики поперечной качки теплохода «Любовь Орлова» ( $T = 4,65$  м,  $h_0 = 1,143$  м): а – бортовая качка; б – вертикальная; в – поперечно-горизонтальная

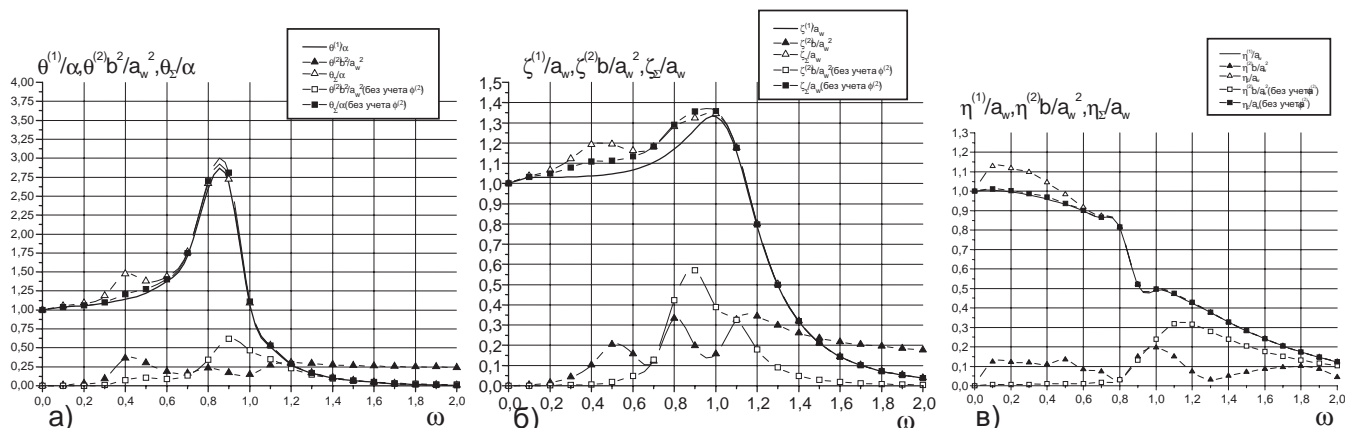


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики поперечной качки навалочного судна «Капитан Гусев» ( $T = 4,8$  м,  $h_0 = 3,09$  м): а – бортовая качка; б – вертикальная; в – поперечно-горизонтальная

Таким образом, расчет нелинейных гидродинамических сил и моментов невозможен без решения нелинейных задач второго порядка и учета соответствующих потенциалов.

Исследование роли отдельных видов качки в образовании нелинейных факторов показано на примере расчетов амплитудно-частотных характеристик, проведенных для теплохода «Любовь Орлова». Для этого амплитудно-частотные характеристики бортовой  $\frac{\theta^{(2)}b^2}{a_w^2}$ ,  $\frac{\theta_\Sigma}{\alpha}$  и поперечно-горизонтальной

качки  $\frac{\eta^{(2)}b}{a_w^2}$ ,  $\frac{\eta_\Sigma}{\alpha}$  рассчитывались без учета составляющих

нелинейных горизонтальной силы и момента, обусловленных вертикальной качкой. Из правой части системы (5) были исключены  $F_{H37}^{(2)}, F_{H23}^{(2)}, F_{H34}^{(2)}, M_{X37}^{(2)}, M_{X23}^{(2)}, M_{X34}^{(2)}$ . АЧХ

вертикальной качки  $\frac{\zeta^{(2)}b}{a_w^2}$ ,  $\frac{\zeta_\Sigma}{a_w}$  были рассчитаны без учета

составляющих, обусловленных бортовой качкой –  $F_{V44}^{(2)}, F_{V24}^{(2)}, F_{V4,0+7}^{(2)}$ . Результаты расчетов АЧХ, полученных при указанных допущениях, приведены на рис.3, из которых видно, что отсутствие учета составляющих нелинейных сил, обусловленных вертикальной качкой приводит к некоторому увеличению амплитуд бортовой и поперечно-горизонтальной качки (рис.3, а и в). Отсутствие учета составляющих суммарной вертикальной силы, обусловленных бортовой качкой  $F_{V44}^{(2)}, F_{V24}^{(2)}, F_{V4,0+7}^{(2)}$  приводит к резкому уменьшению значений безразмерных амплитуд второй гармоники  $\zeta^{(2)}$  в 4 раза и к уменьшению суммарной безразмерной

амплитуды  $\frac{\zeta_\Sigma}{a_w}$  в 1,3 раза в зоне ультрагармонического резонансного режима (рис.3, б). Из вышесказанного ясно,

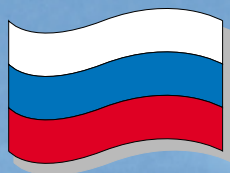
что при взаимодействии бортовой и вертикальной качки наблюдается их обратное влияние друг на друга: бортовая качка приводит к увеличению амплитуд вертикальной, а вертикальная, наоборот, уменьшает амплитуды бортовой.

Таким образом, проведенное исследование показало, что учет нелинейных сил при расчете поперечной качки позволяет выявить дополнительный резонансный режим и уточнить расчеты, получаемые по линейной теории. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kyojuka Y. Experimental Study on Second-Order Forces acting on cylindrical body in waves. – Proc. of the 14th Symp. on Naval Hydrodynamics, Ann Arbor, 1982, p.319-382.
2. Papanikolaou A. On Calculations of Nonlinear Hydrodynamic Effects in Ship Motion // Schiffstechnik, 1984. – Bd.31. – p. 91-129.
3. Potash R.L. Second-order theory on oscillating cylinders // J.S.R. – 1971. – Vol.15. – N.4.
4. Wehausen J.V., Laitone E.V. Surface waves // Encyclopedia of physics, Berlin, 1960. – vol.9. – P.482-490.
5. Семенова В.Ю. Исследование и разработка программ расчета нелинейных гидродинамических сил, возникающих при колебаниях контуров корабельной формы на свободной поверхности жидкости. – Дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. СПбГМТУ, 1999.
6. Она же. Расчет нелинейных возмущающих сил второго порядка, возникающих при воздействии регулярного волнения на неподвижные шпангоутные контуры произвольной формы. – Сб. докл. МОРИНТЕХ. – СПб., 2001.
7. Она же. Определение амплитудно-частотных характеристик различных видов колебаний плоских контуров на регулярном волнении с учетом нелинейных сил. – Сб. докл. МОРИНТЕХ. – СПб., 2003. ■

Рецензент: Б.А. Царев, д-р техн. наук, проф.



# *Адмиралтейские Верфи* *300 лет на службе Отечеству*



190121, С.-Петербург, наб. р. Фонтанки, 203, тел.: +7 (812) 114-88-63,  
факс: +7 (812) 571-13-71, [www.admship.ru](http://www.admship.ru), e-mail: [info@ashipyards.com](mailto:info@ashipyards.com)

190121, Fontanka Emb., 203, St. Petersburg, Russia, tel.: +7 (812) 114-88-63,  
fax: +7 (812) 571-13-71, [www.admship.ru](http://www.admship.ru), e-mail: [info@ashipyards.com](mailto:info@ashipyards.com)