

# ВІСНИК



ОДЕСЬКОГО  
НАЦІОНАЛЬНОГО  
МОРСЬКОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ

32

ПАМЯТИ  
ЮРИЯ ЛЕОНИДОВИЧА ВОРОБЬЕВА

---



28 октября 2010 г. на 73 году ушел из жизни прекрасный человек, ученый с мировым именем, выдающийся педагог, руководитель, вице-президент и руководитель южного научного центра Транспортной академии Украины, вице-президент Академии судостроительных наук Украины, академик Академии наук высшей школы Украины, академик Украинской Академии Наук, академик Российской Академии Транспорта, действительный член Британского Королевского общества кораблестроителей

**ВОРОБЬЕВ ЮРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ**

ПАМЯТИ  
ЮРИЯ ЛЕОНИДОВИЧА ВОРОБЬЕВА

---

---

Юрий Леонидович Воробьев родился в Одессе 16 ноября 1937 г. в семье военного инженера. В 1960 году с отличием окончил кораблестроительный факультет Одесского института инженеров морского флота (ОИИМФ, в народе «Водный»). Трудовую деятельность начал с должности мастера корпусного цеха судоремонтного завода № 490 Минморфлота (ныне Илличевский СРЗ). В том же году перешел на работу в ОИИМФ на кафедру теории корабля и больше место работы он не менял.

Работал на должностях инженера, затем младшего научного сотрудника научно-исследовательского сектора института, ассистента. Закончил аспирантуру и в 1966 году защитил кандидатскую диссертацию «Аналитическое исследование и способы расчета волнового сопротивления судов при движении на глубокой воде и мелководье» по специальности 05.08.01 «Теория корабля». В 1968 году Воробьеву Ю.Л. было присвоено звание доцента кафедры теории корабля, а в 1976 он был назначен ее заведующим. Под его руководством и при личном участии сформировалось признанное во всем мире научное направление кафедры – «асимптотическая теория качки». Эта отрасль судовой гидродинамики характеризуется глубокой разработкой актуальных проблем мореходности транспортных судов на основе широкого применения новейшего математического аппарата и вычислительных технологий и ориентировано на повышение уровня безопасности мореплавания и эффективности эксплуатации флота и портов.

Признанием результатов этого этапа жизни стала блестящая защита докторской диссертации «Асимптотическая теория качки» в 1984 г. и присвоение в 1985 году звания профессора кафедры теории корабля.

Идеи Юрия Леонидовича были развиты его многочисленными учениками. Под его руководством подготовлено 26 кандидатских диссертаций.

Основные итоги научной деятельности Воробьева Ю.Л. сконцентрированы в монографии «Гидродинамика судна в стесненном фарватере», получившей в 1994 году диплом первой степени Российского научно-технического общества инженеров кораблестроителей им. акад. А.Н.Крылова.

В мае 1989 года Юрий Леонидович был избран ректором ОИИМФ. Главными итогами этого направления его деятельности явилось сохранение института в начале девяностых и преобразование в 1994 в морской университет (ОГМУ) с 12 направлениями подготовки. Признанием успешности четырнадцати лет ректорства явилось получение «Водным» в 2002 году статуса национального морского университета (ОНМУ).

С мая 2003 Ю.Л. Воробьев работал советником ректора Одесского национального морского университета. Был председателем Совета трудового коллектива. Возглавлял Специализированный Совет Д 41.060.01 по

ПАМЯТИ  
ЮРИЯ ЛЕОНИДОВИЧА ВОРОБЬЕВА

---

---

защите кандидатских и докторских диссертаций по направлениям «Теория корабля», «Основания и фундаменты», «Управление проектами и программами», «Транспортные системы».

Воробьев Ю.Л. награжден почетными знаками «Заслуженный работник народного образования Украины», «Заслуженный работник транспорта Украины», «Почетный работник морского и речного транспорта», государственной наградой «Подяка прем'єр міністра України».

Он любил спорт – занимался плаванием и парусным спортом. Был председателем Одесской областной федерации парусного спорта.

Юрий Леонидович работал до последнего дня – в октябре ездил в Киев для перерегистрации Специализированного Совета, в Варну – на международную научную конференцию, читал лекции, руководил кафедрой «Теория и проектирование корабля» ... ..



Ректор  
Одесского национального  
морского университета  
проф. Морозова И.В.

## УЧИТЕЛЬ, УЧЕНЫЙ, ВОДНИК

---

---

Мне кажется, что эти три слова, именно в такой последовательности, наиболее кратко отражают то, кем был Юрий Леонидович Воробьев для меня лично, а также, я полагаю, для многих других его учеников и коллег.

Прошло почти 28 лет с того дня когда я увидел его входящим в 1-ю поточную аудиторию, где он начал читать первую лекцию по гидромеханике для нашего потока корабелов 3-го курса. Мне кажется, что это было вчера. Прекрасный лектор, он свободно владел и материалом и аудиторией; ему удавалось поддерживать живой контакт со студентами несмотря на всю математическую насыщенность предмета, которая обычно не всем студентам давалась легко. Его лекции по гидромеханике, по качке корабля, а также лекции по волновой гидродинамике, которые он специально разработал и читал на кафедре по вечерам для аспирантов и сотрудников, представляли собой не обзоры, а полноценные курсы. Они содержали не только ключевые сведения по предмету, но и все промежуточные рассуждения и выкладки, необходимые для его полного понимания. Через годы и расстояния, конспекты его лекций по прежнему со мной, и частенько служат по прямому назначению.

Сегодня, с учетом моего личного опыта и наблюдений за практикой преподавания, в том числе в университетах других стран, я считаю что нам – корабелам Водного института 70-х-90-х – посчастливилось. Посчастливилось потому, что нас учили «глыбы» – те, кто не только знал предмет вдоль и поперек, но и обладал талантом, трудолюбием и потрясающей увлеченностью своим делом, чтобы донести свои знания до нас – студентов. Одной из таких «глыб» был Юрий Леонидович.

Позднее, из общения с Юрием Леонидовичем вне студенческих занятий, я постепенно понял, что его лекторское мастерство являлось только одной из составляющих того, что он, как мне кажется, по-человечески любил делать: быть наставником для молодых, учить и помогать студентам, аспирантам, будущим инженерам впитывать знания, и решать новые научные задачи.

С одной стороны, Юрий Леонидович предлагал своим студентам и аспирантам сложные темы для дипломных работ и кандидатских диссертаций, а с другой – сам всегда предлагал ключевой метод решения, руководил его процессом и был в курсе того, как аспирант работает. Поэтому для аспирантов и сотрудников кафедры «Теория корабля» Юрий Леонидович был не просто руководителем аспирантуры, заведующим кафедрой, а наставником, который вникал во все детали их работы. В обиходе мы называли его «Шеф» или «Учитель», вкладывая в эти слова самое искреннее уважение. Эта роль наставника зачастую как бы естественно распространялась на жизненные, бытовые ситуации его учеников и коллег, которым он много и часто помогал, принимая прямое участие в их судьбе.

Я с благодарностью вспоминаю, как он нашел время, чтобы выслушать мой лепет о том, как я не успевал отслеживать показатели успе-

## УЧИТЕЛЬ, УЧЕНЫЙ, ВОДНИК

---

ваемости факультета и докладывать их в деканат. Это было в 1983 году, когда я был студентом 3-го курса, и начинающим комсоргом. Мы были едва знакомы. До разговора с ним проблема казалась мне ужасной. Я не помню, с чего вдруг начался тот разговор, видимо он почувствовал мою напряженность и просто предложил мне рассказать, в чем дело. Мы уединились где-то возле входа в старый корпус и минут десять стояли, курили вдвоем (грехи молодости!) и говорили – заведующий кафедрой, доктор наук и 19-летний студент... Я помню как я вернулся домой в тот день с чувством, что я не один, и что есть доступный человек, у которого я могу попросить совета, и к которому с того самого дня я проникся огромным уважением. Таким доступным и открытым для обмена мнениями он был со мной всегда, даже тогда, когда наши мнения различались.

Но первое и главное, чем Юрий Леонидович привлекал к себе учеников и коллег – это своей увлеченностью наукой. Эта увлеченность сквозила в его лекциях с самого первого дня и передавалась студентам. Выражаясь языком гидродинамики, можно сказать, что его научный импульс создал такой градиент давления, который вовлек в движение много талантливых людей и привел к образованию на кафедре «Теория корабля» ОИИМФа научной школы. Я хорошо помню случайную фразу, которую где-то в 1986-м (или около этого) году профессор Ремез, возглавлявший тогда кафедру в Николаевском Кораблестроительном институте, уважительно обронил в процессе обсуждения диссертации одного из аспирантов Юрия Леонидовича: «Да, у вас тут школа...». Это было действительно так.

Не претендуя на обзор состояния гидродинамики судна к середине 70-х-началу 80-х годов, я выскажу свое личное мнение, что советская школа волновой гидродинамики в то время была представлена ограниченным числом фундаментальных исследований. К этому времени линейная теория качки была в основном сформирована на основе гипотезы плоских сечений и работ Крылова и Хаскинда. Большинство серьезных исследований было посвящено двумерным задачам качки шпангоутных контуров или преобразованиям формул и уравнений качки к более обоснованному или удобному расчетному виду. Высказывалось мнение, что развитие линейной теории качки завершилось, так как основные ее задачи были якобы решены. При этом не учитывалась ограниченность гипотезы плоских сечений в том виде, в котором она была интуитивно введена Хаскиндром, и неприменимость этой гипотезы, например, для последовательного учета скорости хода судна или для описания течений вокруг корпуса судна на мелководье.

В это же самое время Огильви, Ньюман и целый ряд других зарубежных ученых использовали фундаментальные результаты Хаскинда, и предприняли критическое развитие теории плоских сечений на основе применения теории тонкого и удлиненного тела. В контексте удлиненного тела в задачах гидродинамики судна появилось «ближнее» течение,

## УЧИТЕЛЬ, УЧЕНЫЙ, ВОДНИК

---

---

соответствующее гипотезе плоских сечений, а также «дальнее» течение, соответствующее 3-х размерному течению вдали от корпуса. Для сопоставления двух течений и был применен метод сращиваемых асимптотических разложений. Новый подход позволил иначе интерпретировать и значительно расширить возможности теории, а также решить такие практические задачи, которые до этого не могли быть даже сформулированы.

Юрий Леонидович был одним из немногих советских ученых – последователей Хаскинда, который работал в этом направлении, и внес существенный вклад в развитие новых методов гидродинамики судна, как в своих собственных работах, так и руководя работами своих учеников и коллег. В первую очередь, сюда следует отнести решенные им задачи, связанные с качкой, просадкой и взаимодействием судов при движении на мелководье. Для расчета гидродинамических сил качки Юрий Леонидович ввел в практику использование асимптотических формул, идея которых восходит к Кочину и Хаскиндю. Следует отметить, что привнесение нового математического аппарата, каким являлся метод сращиваемых асимптотических разложений, в инженерную дисциплину – задача не из легких, которая требует настойчивости и изрядной смелости. Юрий Леонидович с этой задачей справился. Более того, разработанные им расчетные методы находили применение при разработке новых нормативных документов для проектирования портовых акваторий и подходных каналов.

В последние десятилетия в гидродинамику судна активно внедряются численные методы, в первую очередь метод граничных элементов для течений идеальной жидкости, а также численная механика жидкости (Computer Fluid Dynamics (CFD)) для решения уравнений Навье-Стокса в общем виде. Может создаться иллюзия, что в дальнейшем развитии теории качки необходимости больше нет. Я не думаю, что это так. Развитие численных методов отнюдь не означает, что гидродинамическая теория более не нужна. Наоборот, новые численные методы выдвигают новые требования, ставят новые проблемы и предоставляют новые инструменты для реализации теоретических решений. Они также имеют свои ограничения. Кроме того, проверка, сопоставление, обобщение численных экспериментов требуют альтернативных решений и теоретических построений. В этом отношении, методы гидродинамики судна, основанные на концепции удлиненного тела, в развитие которых Юрий Леонидович внес значительный вклад, играют и будут играть важную роль. Продолжающееся в настоящее время развитие метода плоских сечений и его применение для решения уже нелинейных задач качки, расчета волновых нагрузок и вибрации на ходу – прямое этому подтверждение.

Следует, наконец, подчеркнуть, что метод сращиваемых асимптотических разложений, как и методы возмущений вообще, является универсальным и плодотворным не только в гидродинамике удлиненного тела, но и во многих других инженерных приложениях. Я помню, как я

## УЧИТЕЛЬ, УЧЕНЫЙ, ВОДНИК

---

---

впервые уловил это на одной из лекций, которые Юрий Леонидович читал в конце 80-х годов для аспирантов. Это подтолкнуло меня к дальнейшему чтению и позволило сформировать свой взгляд как на асимптотический метод, так и на традиционные концепции, которые обычно вводятся без ссылок на асимптотические теории. Именно за эту возможность, за повод к размышлению я всегда остаюсь благодарным ему, как своему наставнику.

В заключение хотелось бы сказать, что Юрий Леонидович был не только учителем и ученым, но и настоящим «водником». Сам выпускник Одесского «Водного» института, прошедший в нем путь от аспиранта до ректора, он был безгранично предан институту и ставил его цели и интересы превыше всего. Будучи избранным ректором ОИИМФа в те годы, когда большая страна, ее экономика, система образования и установившиеся связи в системе морского флота распались, Юрий Леонидович приложил все свои силы к сохранению института, укреплению его статуса, аккредитации инженерных курсов и сохранению кадров. Как рядовой сотрудник кафедры «Теория корабля», я только «краем уха» улавливал, какие по сложности управленческие проблемы ему приходилось решать каждый день. Наверно не все ему удавалось, и не со всеми его решениями в те годы я был однозначно согласен. Но я понимаю, что он всегда руководствовался интересами института, который был для него не просто местом работы, а местом его жизни. Я с восхищением вспоминаю, что и будучи ректором, он продолжал руководить кафедрой, работой аспирантов, читать и корректировать отчеты и диссертации, готовить публикации.

Наследие Юрия Леонидовича Воробьева – это не только его блестящие лекции, оригинальные научные работы, кафедра «Теория и проектирование корабля, и даже не только Одесский национальный морской университет, в укрепление которого он вложил столько сил.

По моему мнению, наследие Юрия Леонидовича – это, в первую очередь, его ученики и коллеги, которых он учил, которых поддержал, которым передал свои идеи, помог стать на ноги и сформироваться как профессионалам. Многие его ученики работают в Одесском национальном морском университете, в других организациях в Украине, России, в других странах. Проектируют, строят и эксплуатируют суда, оффшорные конструкции, порты, развивают науку, читают лекции. И не очень важно, что именно и где они это делают. Важно то, что Юрий Леонидович Воробьев воспитал плеяду образованных людей – инженеров, ученых, педагогов, которые будут всегда помнить его как «УЧИТЕЛЯ».

## УТРАТА ДРУГА

Профессор Юрий Леонидович Воробьёв (для меня он был просто Юра, как я для него – Фима) был одним из самых близких моих друзей за всю мою долгую семидесятирёхлетнюю жизнь: сорок два года в Союзе и тридцать один – в США. С Юриной смертью, неожиданной и ужасной, – не только для его семьи, его друзей и коллег в Одессе, но и для нас в Америке, – ушла большая часть нашей собственной жизни.

Я познакомился с Юрой в 1953 году, когда мы были в девятом классе. Юра учился в 39-й, я – в 118-й школе. Мы оказались рядом на заключительном туре математической олимпиады школьников. Худенький, блондинистый, спортивного типа мальчик с умными, живыми и, было видно сразу, добрыми глазами, располагал к себе и вызывал доверие. Эти качества сохранились у Юры на всю жизнь, когда он уже давно не был ни худеньким, ни мальчиком. Устроители олимпиады предложили, кажется, пять задач. Юра знал, как решить три из них, а я чувствовал, что могу справиться с двумя остальными. Мы «скооперировались», и оба получили призы.

В следующем году мы встретились снова, когда толпа абитуриентов-медалистов собралась у входа в здание ОИИМФа в ожидании собеседования. Нас зачислили на кораблестроительный и направили под начало Кости Кокоржицкого (в то время – лаборанта одной из кафедр гидротехнического факультета) вколачивать сваи на водной станции института в Отраде. Юра и я «скооперировались» снова, и Костя приставил нас к мощной чугунной «бабе», которая представляла собой буфер железнодорожного вагона с четырьмя ручками, приваренными с двух сторон. За две держался Юра, за две – я. По Костиной команде типа «эй, ухнем!» мы опускали «бабу» на очередную сваю. Нам, крепким семнадцатилетним ребятам, всё было тогда под силу!

Юра был, как всегда и во всём, лучшим на потоке по всем дисциплинам. Остальные следовали за ним с большим разрывом. Юра даже получал, если не ошибаюсь, ленинскую стипендию. Неудивительно, что после окончания (с красным дипломом, разумеется) Юру оставили в аспирантуре при кафедре теории корабля. Его руководителем стал А.А. Костюков, заведующий кафедрой и проректор по учебной работе. Юра был предоставлен, однако, самому себе. Его диссертация по волновому сопротивлению была всё равно одной из лучших, если не самой лучшей, за всю историю факультета.

Я хорошо знал Юрину семью: Леонида Гавриловича, Валентину Ивановну и даже жившую с ними ужасно скрюченную и очень интеллигентную старушку, тётю Валентины Ивановны. Юра называл её с любовью и несколько непочтительно «бабкой». Как и все Воробьёвы, старушка эта была незаурядной женщиной: учительствовала ещё в дореволюционной гимназии и активно участвовала в составлении русско-караимского словаря. Воробьёвы, включая «бабку», очень гордились Юрой, и было кем и за что. В Америке его бы назвали «self-made man». Умный, талант-

## УТРАТА ДРУГА

ливый, энергичный, волевой, целеустремлённый, прирождённый лидер и добрый, очень добрый человек. Я многим ему обязан. Да и я ли один! В 1965 году, с Юриной «подачи», меня «взяли на нисовскую тему» в опытовый бассейн. Юра сделал почти невозможное: ведь я был самым что ни на есть типичным представителем «некоренной национальности»! У Ю.М. Гулиева был тогда многолетний проект с продолжением (от Черноморпроекта, кажется) по поведению судов на мелководье, и мы, включая Юру, с утра до вечера таскали и качали модели, изготовленные искусным модельщиком Констаниди, и строили бесконечные графики.

Помню, когда Юра познакомился с Леной (Еленой Михайловной) и представил ей меня. Это была настоящая любовь, которая прошла через всю Юрину и Ленину жизнь. Юра умел и дружить, и любить. Юра женился в 1965 году, а я – на моей нынешней жене Рае, тоже «оимфовке», – в 1968-м. Благодаря Лене, Юре и Рае, дружба наших семей оказалась такой же многолетней, искренней и прочной, какой была наша «холостяцкая» дружба.

Вспоминаю наше чудесное путешествие в 1966 году на теплоходе «Грузия» по Крымско-Кавказской линии (Юра, Лена, Валя и Рая Сиряченко, Слава Кобяков) и наши весёлые «рыбалки» (Юра, Лена, Володя Кириллов, Коля Митчих, Эдик Коханов). Это шумное «рыболовецкое общество» (с сильным научным, главным образом, гидромеханическим, уклоном) собиралось сначала в Отраде, а потом – на даче Воробьёвых (на даче Ковалевского). Бессменным лидером этого общества и рыбаком № 1 был, разумеется, Юра (я с трудом мог отличить бычка-песочника от бычка-ротана, а Юра был профессионалом во всём, даже в рыбной ловле), а его душой – Юра и Лена. Мы даже затеяли, как истинные кораблестроители, постройку шаланды, но наша теоретическая направленность помешала нам довести это практическое дело до конца: шаланда так и не сошла со «стапелей» воробьёвской дачи. В дополнение к высокой квалификации, доброму уму и умному сердцу, Юра обладал исключительно важным качеством для руководителя: в Америке это качество называют «communication skills». Оно включает умение не только убедительно говорить, но и умение внимательно слушать, и никогда не обижать других. «Расписывание» преферансных «пулек» (Юра был силён и в этом) было для Юры одним из действенных средств общения на равных с друзьями-коллегами. Я понимал это тогда и продолжаю ценить это Юрино качество сейчас, сорок лет спустя.

В 1975 г. наша семья переехала в Вильнюс, а в декабре 1979-го мы получили разрешение на выезд из Союза. И покидавшие страну, и остававшиеся в ней были уверены, что такой отъезд – навсегда. В Одессе оставались два моих близких друга – Юра Воробьёв и Валя Сиряченко. Чтобы не подводить их, я передал через третьих лиц, что уезжаю и что благодарен им за всё, что они для меня сделали. И Юра, и Валя, независимо друг от друга и не сговариваясь, приехали в Вильнюс прощаться! А

## УТРАТА ДРУГА

---

ведь сами они никуда уезжать не собирались, и, как говорят, им было что терять!

С Юрой и Леной я дважды встречался позже, когда уже жил в Америке. Первая встреча, в 1998 г., стоит того, чтобы рассказать о ней подробнее. Не вдаваясь в детали, скажу, что выезжала моя семья в 1979 г. из Союза не вполне «безболезненно». Пришлось здорово «испортить отношения» с советской властью и её авангардом – госбезопасностью. Иначе мы бы просто не выехали. Я понимал, конечно, что положение изменилась после развала Союза и отделения Украины в отдельное государство, но всё же не был вполне уверен, что уже не нахожусь «под колпаком у Мюллера». Поэтому не скрою, что мне стало как-то не по себе, когда после приземления нашего самолёта “Austrian Airlines” в одесском аэропорту в салон вошёл характерного типа «товарищ в штатском» и с непроницаемой физиономией и с металлом в голосе спросил, кто здесь доктор Сухир, и предложил следовать за ним. Ситуация к счастью прояснилась, когда мы, следуя за этим самым «товарищем» и выйдя из здания аэровокзала, увидели присланный, как сообщил наш «товарищ», ректором Воробьёвым роскошный белый микроавтобус с впечатляющей надписью большими буквами: VIP. Было приятно сознавать, что этой «очень важной персоной» оказался я. Приём, оказанный нам Юрой и Леной, был поистине царским. Было, конечно, что вспомнить и о чём поговорить «за жизнь» после почти двадцати лет жизни в разных странах-мирах.

Мы все, конечно, скорбим по поводу тяжёлой и безвременной утраты, но, как сказал поэт, «печаль моя светла»: все мы смертны, но я благодарен судьбе, что в начале моего жизненного и профессионального пути я встретил Юру – профессора **Юрия Леонидовича Воробьёва**, выдающегося учёного и исключительного человека. Низкий поклон его праху и да будет земля ему пухом!

## КАК МНОГО НЕ СКАЗАНО, КАК МНОГО НЕ СДЕЛАНО ...

---

Мне выпала удача познакомиться с ним в 1969 году, когда я перешёл на работу в ОИИМФ на должность заведующего опытовым бассейном из ЧЦПКБ. С первой минуты знакомства меня поразили его доброжелательность, отзывчивость и радушие, которые сопровождали и в дальнейшем нашу совместную работу и дружбу.

Мы были почти одного возраста с Юрием Леонидовичем и это значительно упрощало наши контакты, как по работе, так и в личном общении. В 1969 году он был молодым кандидатом технических наук, защитившим диссертацию по волновому сопротивлению судов и нацеленным на дальнейшее развитие теории корабля в этом направлении. Несмотря на наличие таких корифеев кораблестроительной науки, бывших руководителями кафедры, как проф. Д.А.Чумак, проф. А.А. Костюков, доц. Ю.М. Гулиев, Юрий Леонидович уже в то время фактически начал определять научные направления на кафедре теории корабля. После ухода этих замечательных людей Юрий Леонидович прошёл путь от заведующего кафедрой, декана кораблестроительного факультета до ректора ОИИМФ, которым он успешно руководил в непростые 90-е годы.

Трудолюбие Юрия Леонидовича было невообразимо. Помимо грандиозной теоретической работы, которую он провёл, создав теорию срачиваемых асимптотических разложений в гидродинамике судна, большое внимание он уделял созданию собственной школы, воспитав многочисленную плеяду кандидатов и докторов наук. Мне часто приходилось видеть, как запершись в своём кабинете с очередным аспирантом, он объяснял и объяснял до тех пор, пока взмокший претендент не понимал существа проблемы и не уходил, обессиленный, от своего «настырного» руководителя. Мне и самому, будучи его аспирантом, пришлось это испытать.

А заседания кафедры! Ни разу за время этих заседаний нам не приходилось слышать от него не только грубого слова или окрика, но только в самом крайнем случае выраженные в юмористическом духе очень мягкие порицания. А юмор у Юрия Леонидовича, как потомственного одессита, был в полном порядке. В этом, кстати, не раз убеждались часто приезжавшие в Одессу не очень склонные к юмору ленинградские научные работники. Будучи шефом, Юрий Леонидович никогда не приказывал, он только очень мягко просил выполнить какую-либо работу.

Контакты его с научным миром, как в СССР, так и за рубежом, были очень широки. Обладая хорошим знанием английского языка ещё со школы, он великолепно представлял советскую научную гидродинамическую школу на зарубежных конгрессах и конференциях. До распада СССР ни одна конференция по теории корабля и гидродинамике судна («Крыловские чтения») не проходила без участия Юрия Леонидовича или его сотрудников. Две такие конференции были проведены на базе

## КАК МНОГО НЕ СКАЗАНО, КАК МНОГО НЕ СДЕЛАНО ...

---

кафедры теории корабля в Одессе. Это стало возможным благодаря авторитету Юрия Леонидовича в научной корабельной среде.

Студенты обожали Юрия Леонидовича. Несколько раз мне приходилось слушать его лекции (а он читал сложные курсы гидромеханики, качки корабля, математических методов моделирования), и я видел, как доступно он объяснял студентам непростые закономерности. И всё это сдабривалось доброй порцией юмора, что способствовало хорошему контакту с аудиторией.

Юрий Леонидович, если была необходимость в решении какой-либо новой проблемы, никогда не стеснялся привлекать специалистов из других областей науки таких, как математика, строительная механика корабля или теоретическая механика. Так, часто сотрудничали с нашей кафедрой доц. Ю.Л. Шмульян, проф. Я.Л. Нудельман, проф. В.В. Козляков, доц. Д.М. Гитерман, проф. В.Г. Сизов и др.

Вне работы Юрий Леонидович оставался всегда весёлым, милым, деятельным, внимательным человеком. Ох, сколько пулек расписано с ним, сколько поймано рыбы и не просто каких-то голышей или бычков, а самой настоящей чудесной ставриды, сколько проведено праздников вместе с ним. А также и яхтенных гонок. Вспоминаю 1984 год. Институт только что получил новую яхту, и она попала на нашу кафедру теории корабля. Естественно, мы её назвали «Архимед». И вот втроём, в том числе Юра, выходим в стомильную гонку на Кубок Чёрного моря. Июнь, светит яркое солнышко, работает приятный бриз, и мы несёмся по волнам. Утром оказались на траверзе молдавского пансиона на Каролино-Бугазе. Сыплет мелкий дождь, полный штиль, и мы медленно дрейфуем недалеко от молдаван. В течение дня мы слышим регулярное – Первая смена на завтрак! – Потом – Первая смена на обед! – Потом – Первая смена на ужин! – Представляете, слышать это нам, промокшим до костей, съевшим все припасы, и без надежды на движение. К тому же мы не взяли с собой дополнительной одежды. И вот великодушный Воробьёв, видя моё теловычитание и мою дрожь, отдаёт мне свой последний сухой свитер (или куртку). Я этого никогда не забуду. Ну, и задул ветер, и убился дождь, и всё пошло как надо. И мы были на финише не первыми, но и не последними.

Хочется вспоминать и вспоминать. Как много не сказано, и как много ещё не сделано. А его уже нет. Вечная ему память!

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

---

*Розглядаються основні принципи проектування корпусів суховантажних та нафтоналивних суден змішаного ріка-море плавання, побудованих у 2001-2010 роках. Показано, що ці судна проектуються з повним використанням габаритів шлюзів внутрішніх водних шляхів, максимально можливим з позиції забезпечення ходовості коефіцієнтом загальної повноти, підвищеною вантажомісткістю за мінімально можливою висотою борту; підвищеною керованістю в обмежених умовах і на мілководді; обґрунтованою експлуатаційною надійністю конструкцій судового корпусу за оптимальною металоемністю останнього.*

*Рассматриваются основные принципы проектирования корпусов сухогрузных и нефтеналивных судов смешанного река-море плавання, построенных в 2001-2010 годах. Показано, что эти суда проектируются с полным использованием габаритов шлюзов внутренних водных путей, максимально возможным с позиций обеспечения ходкости коэффициентом общей полноты, повышенной грузоместимостью при минимально возможной высоте борта; повышенной управляемостью в стесненных условиях и на мелководье; обоснованной эксплуатационной надежностью конструкций судового корпуса при оптимальной металлоемкости последнего.*

*Basic designing principles of dry-cargo vessels and tankers hulls of river-sea going type that have been built during 2001-2010 are considered. It is shown that all these vessels are designed with fully use of locks dimensions of internal water-ways, maximum possible block coefficient with providing best propulsion qualities, increased tonnage with minimum possible depth; increased controllability in constrained conditions and in shallow water; grounded operating reliability of hull construction with optimum specific quantity of hull metal.*

**Ключевые слова:** суда смешанного река-море плавання, корпус судна, класс судна, металлоемкость, конструкция, набор, грузоместимость, мощность главных двигателей.

**Постановка проблемы.** Современная концепция судна смешанного река-море плавання (ССП) была сформулирована в публикациях автора [1, 2, 5] следующим образом: это транспортное судно с полным использованием габаритов внутренних водных путей (ВВП), максимально возможным с позиций обеспечения ходкости коэффициентом общей полноты, повышенной грузоместимостью при минимально возможной высоте борта; повышенной управляемостью в стесненных условиях и на мелководье; обоснованной эксплуатационной надежностью конструкций судового корпуса при оптимальной металлоемкости последнего.

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

---

При этом предполагалось назначение классов по районам плавания в соответствии с планируемыми направлениями перевозок и оценкой возможных потерь ходового времени от простоев в ожидании погоды; определение ледовой категории в соответствии с накопленным опытом работы; задание экономически обоснованного срока службы судна.

Однако опыт проектирования при этом базировался на судах «море-река», ориентированных на эксплуатацию в европейской части ВВП России. В период с 2005 года в Морском Инженерном Бюро (МИБ) были созданы суда для работы в устьевых портах Азовского моря, суда «река-море», проработаны проекты для сибирских рек.

**Целью настоящей статьи** является уточнение сформулированных ранее принципиальных подходов по проектированию корпусов ССП на основе полученных после 2005 года решений при создании новых проектов МИБ.

Изложение основного материала. В развитии изложенных в работах [1, 2, 5, 7], предлагаются следующие основные принципы проектирования судов смешанного плавания, которые реализованы и продолжают реализовываться в проектах МИБ:

– в соответствии с предполагаемыми направлениями перевозок и оценкой возможных потерь от простоев в ожидании погоды выбран класс РС R2 для судов и барже-буксирных составов смешанного река-море плавания «Волго-Дон макс» класса (для обеспечения постоянной эксплуатации в море, в том числе вокруг Европы), класс PPP «О-ПР 2.0» для судов и барже-буксирных составов «Волгомакс» класса (минимальный класс для эксплуатации в весенне-летний сезон в Финском заливе и Азовском море), класс PPP М-СП 3.5 для судов северных пароходств (позволяет эксплуатировать суда в условиях морского перехода по Северному морскому пути от полуострова Таймыр до полуострова Чукотка в июле-сентябре);

– в соответствии с накопленным опытом работы выбран класс ЛУ1 (Лед 20-Лед 30) у судов смешанного плавания, предназначенных для работы в Азовском и Каспийском морях зимой, класс ЛУ1 (Лед 40) – у судов сибирских пароходств для обеспечения безопасного возврата судна после осуществления «северного» завоза на базу, ЛУ2 – для работы в Балтийском море зимой, ЛУ3 – для работы на порт Архангельск зимой;

– за счет роста эффективной высоты сечения (применение развитых непрерывных надпалубных конструкций – тронка и комингсов высотой 3,2-3,8 м – (см. пример на рис. 1) увеличена грузопместимость и снижены расходы в отечественных портах при обеспечении достаточной для выбранного класса общей продольной прочности без увеличения толщин подавляющего большинства конструкций в сравнении с минимальными толщинами по Правилам РС;

– применение продольной системы набора палубы, бортов и днища в средней части (см. рис. 1), что в сочетании с увеличением попереч-

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

ной шпации и одновременном уменьшении шпации продольного набора обеспечивает более полное участие пластин корпуса в общем изгибе и лучшее восприятие локальных нагрузок при швартовках, прохождении каналов и шлюзов, сохранение приемлемого внешнего вида;

- сохранение толщин настилов и обшивок на уровне минимальных с целью минимизации массы металлического корпуса, решения задач обеспечения местной прочности и устойчивости за счет рационального сочетания элементов основного и рамного набора;

- назначение одинаковых, по возможности, толщин обшивки, стенок рамного и холостого набора для обеспечения равной долговечности по износу;

- проектирование конструкции борта, днища на восприятие эксплуатационных нагрузок, большинство которых считаются до сих пор «непроектными» (контакты с гидросооружениями, грунтом и т.п.);

- с целью увеличения фактической усталостной долговечности проектирование «гладких» конструкций поясков эквивалентного бруса с минимальным количеством технологических вырезов, приварышей и т. п., использование рационально исполненных узлов пересечения связей и плавного изменения площадей продольных связей корпуса по длине;

- исключение для танкеров внутреннего набора в грузовых танках (наружный набор верхней палубы и тронка, поперечные переборки с горизонтальными гофрами).

Некоторые характеристики существующих ССП и судов новых проектов, разработанных МИБ, в соответствии с изложенной в [1] методикой, приведены в таблице 1 (танкера) и в таблице 2 (сухогрузные суда). Информация по существующим ССП дана с учетом модернизации и увеличения металлоемкости в результате подкреплений их корпусов [3, 7].

Удельная металлоемкость судов из таблицы 2 в традиционном виде  $p_{\text{мк}} = P_{\text{мк}} / LBD$  для сухогрузных судов приведена на рис. 2, а для танкеров смешанного плавания на рис. 4. С учетом отмеченного выше указания о развитых надпалубных конструкциях можно рекомендовать применение показателя удельной металлоемкости в виде

$$p_{\text{мк}} = P_{\text{мк}} / LBD',$$

где  $D' = D + \frac{L_{\text{гн}} \cdot B_{\text{гн}} \cdot h_{\text{к}}}{L \cdot B}$  – приведенная высота борта;

$P_{\text{мк}}$  – масса металлического корпуса;

$L_{\text{гн}}$ ,  $B_{\text{гн}}$  – длина и ширина грузового пространства;

$h_{\text{к}}$  – высота комингса люка (тронка для танкера).

Пересчитанная таким образом величина  $p_{\text{мк}}$  приведена для сухогрузных судов на рис. 3, а для танкеров смешанного плавания – на рис. 5.

Для сухогрузных ССП нового поколения класса II с ледовой категорией ЛУ2 (позволяет регулярно работать без ледокольной проводки в

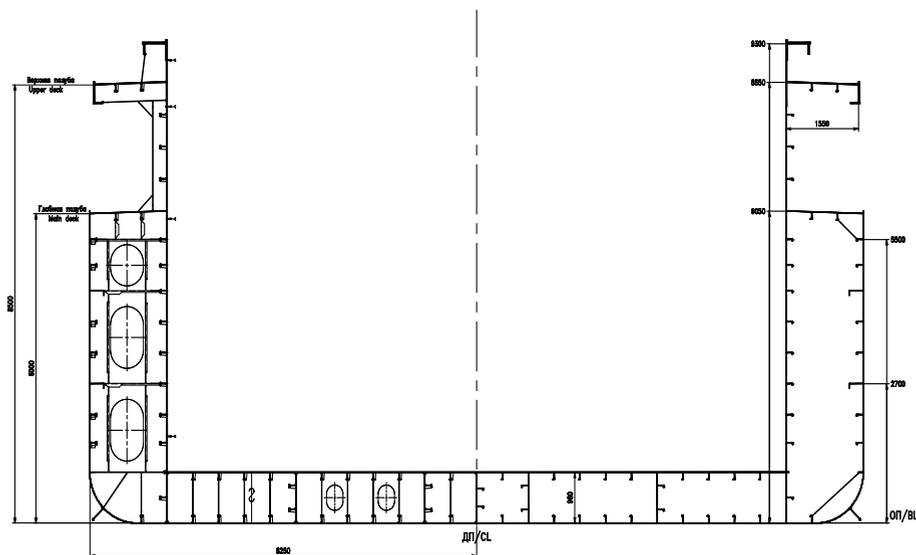
## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

мелкобитом разряженном льду толщиной 0,55 м при скорости 5 узлов) можно рекомендовать зависимость  $p_{\text{МК}} = 0,0847 + 1,55 \cdot 10^{-7} LBD'$ , т/м<sup>3</sup>. Для нефтеналивных ССП нового поколения можно рекомендовать зависимость  $p_{\text{МК}} = 0,1085 + 1,55 \cdot 10^{-7} LBD'$ , т/м<sup>3</sup>.

Следует отметить, что незначительное изменение величины  $p_{\text{МК}}$  связано с использованием для основного корпуса судов длиной более 120-125 м сталей повышенной прочности, а для наиболее нагруженных элементов эквивалентного бруса (продольных непрерывных комингсов) во всем характерном диапазоне длин. Принятая концепция назначения толщин на уровне минимальных позволила не увеличивать удельную металлоемкость  $P_{\text{МК}}/LBD'$  для ССП с развитыми надпалубными конструкциями, хотя в абсолютном исчислении масса металлического корпуса в силу ужесточения требований Правил Регистра безусловно выросла (см. таблицы 1, 2).

Степень изменения весовых характеристик корпуса сухогрузного ССП в зависимости от класса, ледовой категории, системы набора борта и срока службы приближенно можно оценить по таблице 3.

Структурный анализ металлоемкости по группам связей корпусов сухогрузных ССП нового поколения приведен в таблице 4, а для танкеров в таблице 5.



*Рис. 1. Мидель-шпангоут типового сухогрузного ССП  
нового поколения*

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Таблица 1

*Некоторые характеристики тонкороев ограниченных районов плавания*

Проект	$L \times B \times D$ , м	$L_{тп}$ , м	$B_{тп}$ , м	$h_{тп}$ , м	$D$ , м	$P_{кв}$ , т	$N_{двг}$ , кВт	$\Delta$ , т	$N_{двг}/\Delta$ , кВт/т	$\rho_{в}$ , т/м <sup>3</sup>	$\rho_{с}$ , т/м <sup>3</sup>	$P_{кв}/LBD$ , т/м <sup>3</sup>	$P_{кв}/LBD$ , т/м <sup>3</sup>
<b>Проекти Морского Инженерного Бюро</b>													
ЭСТ117	105,46×14,8×3,7	64,8	12,8	0,89	6,17	1298,3	954,3	1030	0,1999	0,88	0,88	0,107	0,089
009RST01	136,2×16,3×6	96,8	13,52	0,95	6,55	1794,4	1593,6	2160	0,2446	0,62	0,84	0,118	0,108
ЭСТ22	138,11×16,6×6	97,5	13,52	0,95	6,55	1987,1	1774,8	2400	0,2507	1,015	1,015	0,129	0,118
ЭСТ23	138,24×16,6×5,5	97,55	12,24	1,45	6,25	1679	1483	2400	0,2722	1,015	1,015	0,118	0,103
<b>Существующие суда</b>													
1577*	128,64×16,5×5,5	0	0	0	5,50	1730	1035	1472	0,2273	0,81	0,81	0,089	0,089
550*	128,64×16,5×5,5	0	0	0	5,50	1642	982	1472	0,2273	0,82	0,82	0,084	0,084
621*	119,55×14,8×5,2	0	0	0	5,20	1588	938	1280	0,2373	1,04	1,04	0,102	0,102
Э77*	105×14,8×4,4	0	0	0	4,40	944	565	1028	0,2677	0,86	0,86	0,083	0,083
1677М	124,51×16,6×6,9	0	0	0	6,90	2316	1505	2208	0,2499	0,58	1,02	0,106	0,106
630*	135,84×16,5×6,4	0	0	0	6,40	2153	1288	1764	0,2062	0,67	0,93	0,090	0,090
ЭСТ09**	88,28×12×5,8	44	9	1,82	6,48	1127	674	920	0,2391	0,82	0,97	0,110	0,098

\* - характеристики судна даны с учетом погрешностей корпуса на класс РС и увеличенных осадки по ШБЛ  
 \*\* - судно после крупных переоборудований  
 $L \times B \times D$  - расчетные длины (по ШБЛ), ширина, высота судна;  $L_{тп}$ ,  $B_{тп}$  - длина и ширина грузовой проволочной;  
 $h_{тп}$  - высота комельса палубы (тремпа для танкера);  $D = D + (L_{тп} \cdot B_{тп} \cdot h_{тп}) / LB$  - проекционная высота борта;  
 $P_{кв}$ ,  $P_{кв}$  - масса корпуса и масса металлического корпуса;  $N$  - мощность главных двигателей;  
 $\Delta$  - водоизмещение по ШБЛ;  $\rho_{в}$ ,  $\rho_{с}$  - спецификационные плотности на осадку в реке (3,60 м) и по ШБЛ ( $\rho = \rho_{в} - V_{тп}$ );  
 $N_{двг}$ ,  $N_{двг}$  - спецификационные УИО на осадку в реке (3,60 м) и по ШБЛ ( $\mu = V_{тп} / P_{кв}$ ); (где  $P_{кв}$  определяется для соответствующей осадки)

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Таблица 2

**Некоторые характеристики сухогрузов ограниченных районов плавания**

Проект	Л x В x Д, м	l <sub>тп</sub> м	B <sub>тп</sub> м	h <sub>к</sub> м	D, м	P <sub>кв</sub> т	P <sub>мв</sub> т	N <sub>мвн</sub> кВт	Δ, т	N <sub>мвн</sub> /Δ, кВт/т	H <sub>к</sub> м/т	H <sub>к</sub> м/т	P <sub>мв</sub> /LBD, т/м <sup>3</sup>	P <sub>кв</sub> /LBD, т/м <sup>3</sup>
<b>Проекты Морского Инженерного бюро</b>														
007RSD04	87,05×15,6×5,75	59,15	13,2	1,5	6,61	896,4	756,8	1290	4985	0,2588	2,07	1,36	0,097	0,084
007RSD03	105,82×16,5×5,5	75,3	12,7	3,75	7,55	1359,7	1139,2	2040	7479	0,2728	2,48	1,49	0,119	0,086
006RSD02	137,44×16,5×6	104,6	12,7	3,33	7,95	1708,2	1499,8	2300	9586	0,2399	2,42	1,64	0,110	0,083
006RSD05	137,44×16,5×6	105,3	13,2	3,33	8,04	1753,1	1546,7	2240	9586	0,2337	2,61	1,71	0,114	0,085
007RSD07	138,51×16,5×6	105,3	12,7	3,33	7,95	1712	1504	2240	9716	0,2305	2,41	1,62	0,110	0,083
RSD17	118,41×16,5×6,2	85,1	12,7	3,62	8,2	1509,3	1419,6	2450	8612	0,2845	1,72	1,64	0,117	0,089
RSD44	138,87×16,5×5	93,6	13,2	2,155	6,16	1454	1285,2	2460	7412	0,3238	1,36	1,36	0,112	0,091
RSD49	137,81×16,5×6	105,3	12,7	3,31	7,95	1958,3	1750,2	2400	9912	0,2421	2,57	1,64	0,128	0,097
<b>Существующие суда</b>														
781*	95×13×5,5	65,78	9,35	0,75	5,88	1044	625	736	3846	0,1914	1,62	1,33	0,094	0,088
1743*	106,03×14,8×5	71,4	10,9	1	5,50	1198	717	824	4375	0,1883	1,44	1,44	0,091	0,083
791*	110,69×13×5,5	84,16	9,35	0,75	5,91	1140	682	972	4450	0,2184	1,53	1,42	0,086	0,080
1557*	110,86×13×5,5	75,08	9,35	0,74	5,86	1271	760	972	4634	0,2102	1,52	1,34	0,086	0,080
2-95*	110,9×13×5,5	79,05	9,52	1,12	6,08	1355	751	1030	4761	0,2163	1,66	1,43	0,095	0,086

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Таблица 2 (продолжение)

Проект	$L \times B \times D$ , м	$L_{гпр}$ , м	$B_{гпр}$ , м	$k_{гпр}$ , м	$D_s$ , м	$\rho_{гпр}$ , т	$\rho_{дв}$ , т	$N_{двгв}$ , кВт	$\Delta$ , т	$N_{двгв}/\Delta$ , кВт/т	$\eta_{гпр}$ , м/т	$\eta_{дв}$ , м/т	$\rho_{дв}/L_{гпр}$ , т/м <sup>3</sup>	$\rho_{дв}/L_{гпр}$ , т/м <sup>3</sup>
<b>Существующие суда</b>														
1963*	136,07×16,5×5,5	94,8	13,22	1	6,06	1665	996	1766	6923	0,2551	1,26	1,26	0,081	0,073
19610*	136,15×16,4×6,7	87,45	11,82	1,01	7,17	2640	1579	1940	8917	0,2176	1,95	1,16	0,106	0,099
19611*	114,03×16,4×6,7	64,9	11,82	1,01	7,11	2390	1430	1940	7306	0,2655	2,08	1,12	0,114	0,107
19620*	85,08×12×6	41,25	9	1	6,36	1067	638	1030	3822	0,2695	1,09	0,85	0,104	0,098
326.1*	80,51×11,6×4	41,3	9,2	3,2	5,30	992	593	882	3143	0,2806	1,4	1,17	0,159	0,120
030744*	105,03×16,5×5,5	64,8	12,6	1,45	6,18	1778	1064	1766	6010	0,2938	1,5	1,16	0,112	0,099
17310	93,77×13,4×6,7	59,7	10,3	2,38	7,86	1760	1053	1740	5602	0,3106	2,66	1,24	0,125	0,107
613	92,99×13×5,5	60	10,2	1,04	6,03	1388	830	736	3945	0,1866	2,04	1,5	0,125	0,114
4884N2/3*	115,98×13,2×6	79,2	9,2	0,86	6,41	1742	1042	1280	5574	0,2296	1,83	1,3	0,113	0,106
1372*	117,68×15×6,5	79,2	8,35	1,23	6,96	2050	1226	1620	6732	0,2399	2,58	1,37	0,107	0,100
030740**	136,29×16,5×5,5	96	13,3	3,58	7,53	2086	1548	1766	7431	0,2377	2,01	1,81	0,101	0,074
5075**	136,31×16,5×5,5	96	13,3	3,58	7,53	1809	1082	1766	7468	0,2365	1,9	1,71	0,087	0,064
002CNF01*	106×16×6,25	0	0	0	6,25	1565	936	1300	4512	0,2881			0,088	0,088

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

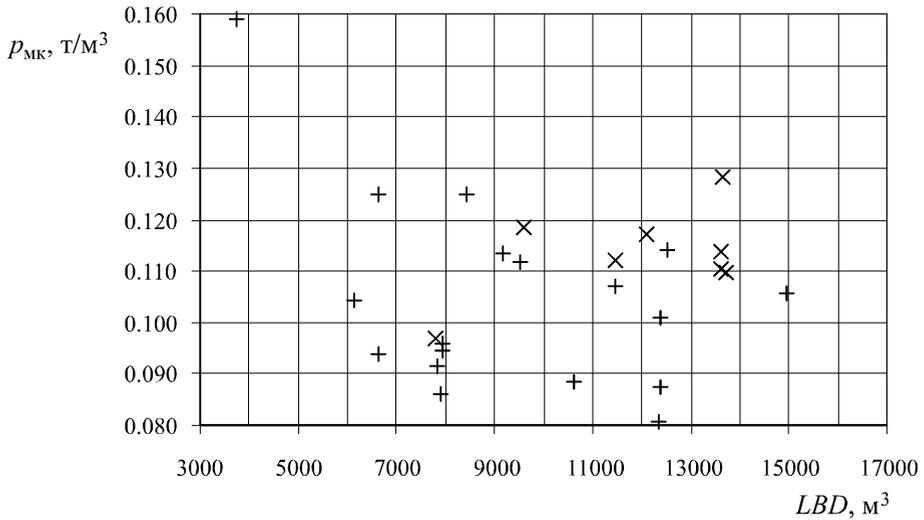


Рис. 2. Измеритель массы металлического корпуса для сухогрузных ССП  
x – проекты МИБ; + – существующие суда

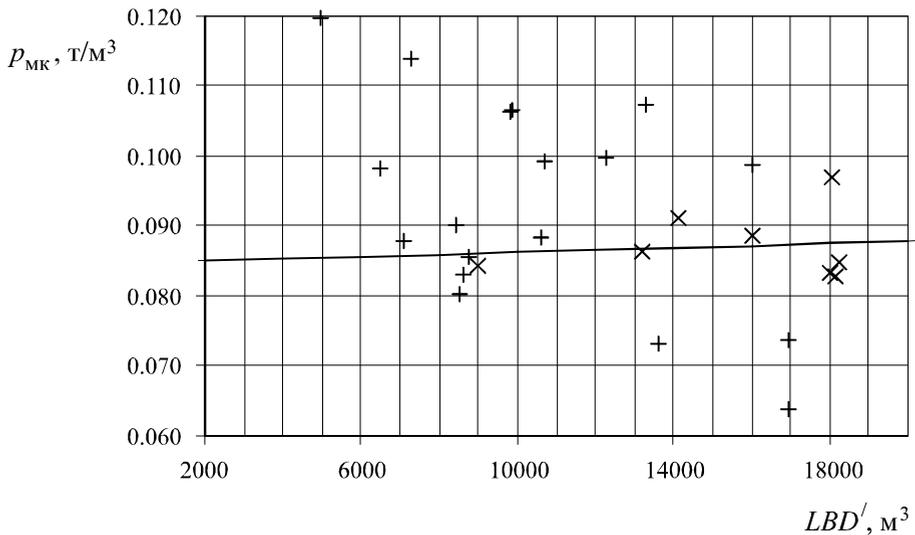
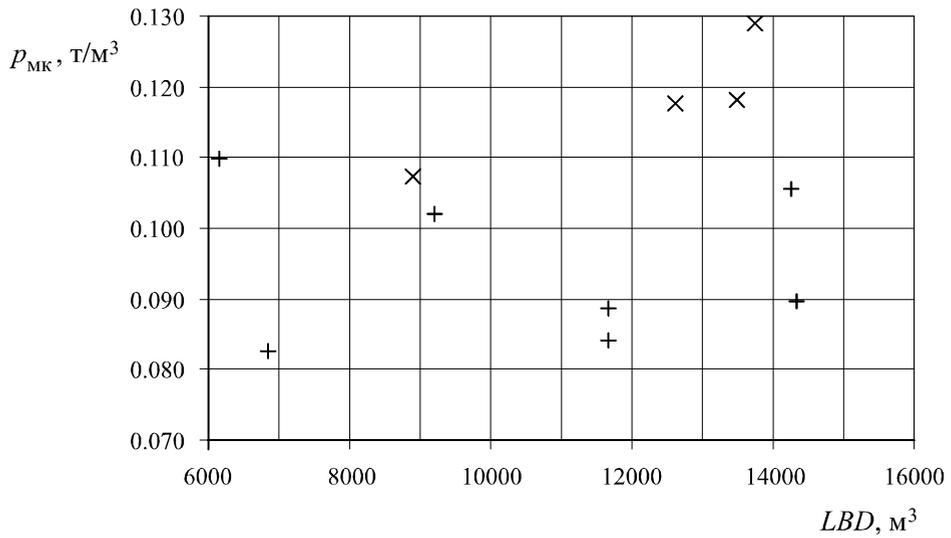
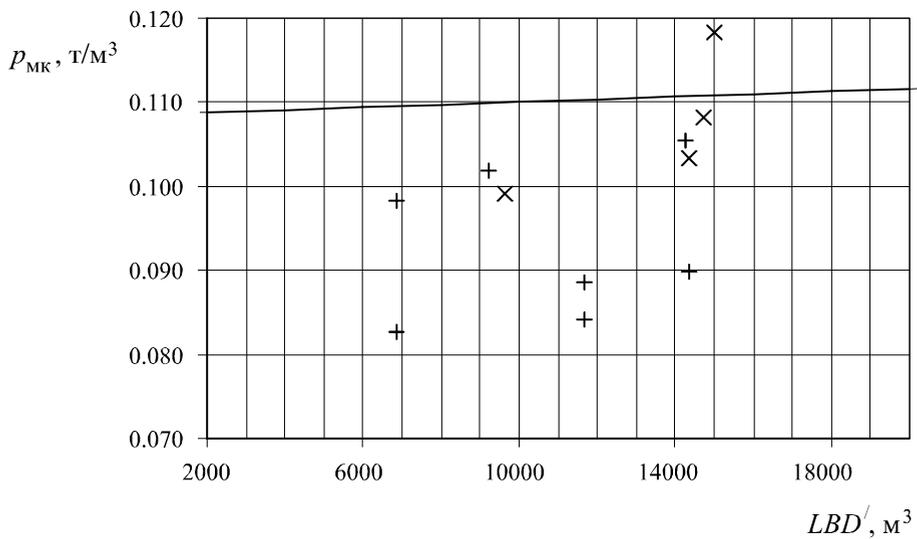


Рис. 3. Измеритель массы металлического корпуса для сухогрузных ССП  
(с учетом приведенной высоты борта)  
x – проекты МИБ; + – существующие суда

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**



*Рис. 4. Измеритель массы металлического корпуса для нефтеналивных ССП  
x – проекты МИБ; + – существующие суда*



*Рис. 5. Измеритель массы металлического корпуса для нефтеналивных ССП (с учетом приведенной высоты борта)  
x – проекты МИБ; + – существующие суда*

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Таблица 3

*Результаты изменения весовых характеристик  
корпуса сухогрузного ССП в зависимости от класса,  
ледовой категории, системы набора борта и срока службы*

Ледовая категория	$R_{\text{нл}}$ , МПа	Класс РС	Срок службы, лет	Изменение веса корпуса по отношению к базовому варианту, %
				при системе набора борта (продольная /поперечная)
ЛУ2	315	ПСП	24	-3,8 / -3,8
			15	-4,6 / -4,6
		ШСП	24	-5,4 / -5,5
			15	-5,9 / -6,0
	235	ПСП	24	0 (базовый вариант) / -0,1
			15	-0,1 / -0,4
ШСП	24	-2,2 / -2,5		
	15	-2,6 / -2,9		
ЛУ1	315	ПСП	24	-4,7 / -4,9
			15	-4,9 / -5,1
		ШСП	24	-6,4 / -6,7
			15	-7,1 / -7,3
	235	ПСП	24	-0,9 / -1,1
			15	-1,4 / -1,6
		ШСП	24	-3,5 / -3,7
			15	-3,9 / -4,2

Для сухогрузных судов (см. таблице 4) можно сделать вывод, что наибольшая доля в общей массе корпуса принадлежит двойному дну – 34-37 %. Доля двойного борта (27-33 %) и палубных конструкций (15-20 %) также практически постоянна и мало зависит от длины судна. Доля надстроек и рубок уменьшается с ростом длины судна  $L$  от 6,4 % до 1,8 %, что объясняется сохранением или незначительным ростом численности экипажа, для которого они предназначены.

По номенклатуре связей структурный анализ составляющих массы корпуса сухогрузных ССП проведен в таблице 6, а для танкеров в таблице 7.

Для нефтеналивных судов (см. таблице 5) можно сделать вывод, что наибольшая доля в общей массе корпуса также принадлежит двойному дну – 28-36 %. Доля двойного борта (20-22 %) практически постоянна и мало зависит от длины судна. Доля палубных конструкций растет с ростом длины и класса судна (от 17 до 29 %). Доля надстроек и рубок уменьшается с ростом длины судна  $L$  от 8,5 % до 5,5 %, что объясняется теми же причинами, что и для танкеров.

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Таблица 4

*Относительное распределение массы корпуса сухогрузных СОРП  
по группам связей*

Судно	Относительная доля группы связи, %					
	днище	борта	палубы	переборки поперечные	надстройки и рубки	прочее
Сухогрузное судно $L = 87,05$ м	34,1	28,1	17,2	7,3	6,4	6,9
Сухогрузное судно $L = 105,8$ м	34,6	29,7	17,2	9,3	3,6	5,6
Сухогрузное судно $L = 118,4$ м	31,1	29,3	19,9	10,2	4,9	4,6
Сухогрузное судно $L = 137,8$ м	34,9	26,3	17,7	10,2	3,0	7,9
Сухогрузное судно $L = 138,5$ м	36,0	27,2	20,2	8,3	3,2	5,1
Сухогрузное судно $L = 138,9$ м	36,6	33,5	15,3	8,2	1,8	4,6
Пр. 507Б	41	33,4	17,6	2,7	-	5,3

Для сухогрузных судов (см. таблицу 6) наибольшую долю в общей массе составляет масса настилов и обшивки – 52-57 %. Значительна роль рамных связей – 20-22 %. Доля холостого набора меньше (около 10 %). Обращает на себя внимание незначительная изменчивость относительных долей связей по номенклатуре при изменении длины судна  $L$ .

Следует отметить, что возросла роль рамных поперечных связей (10-12 %). На судах пр. 507Б их доля составляла около 8 %, что связано с широким применением малых толщин 5-7 мм. Выросли также доля продольных ребер жесткости за счет использования более мощных профилей при сохранении малой продольной шпации и доля продольных рамных связей.

В целом это свидетельствует о перераспределении металлоемкости в пользу набора.

Для нефтеналивных судов (см. таблицу 7) наибольшую долю в общей массе также составляет масса настилов и обшивки – 50-57 %. Значительна роль рамных связей – 23-26 %. Доля холостого набора меньше (около 9-12 %). Также обращает на себя внимание незначительная изменчивость относительных долей связей по номенклатуре при изменении длины судна  $L$ . Доля рамных поперечных связей еще более заметна, чем на сухогрузах (15-18 %).

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Таблица 5

*Относительное распределение массы корпуса нефтеналивных СОРП  
по группам связей*

Судно	Относительная доля группы связи, %					
	днище	борта	палубы	переборки поперечные	надстройки и рубки	прочее
Нефтеналивное судно $L = 105,5$ м	28,4	21,3	17,3	18,8	6,1	8,1
Нефтеналивное судно $L = 138,1$ м	36,3	22,7	21,8	10,1	3,3	5,8
Нефтеналивное судно $L = 138,2$ м	30,8	21,0	29,1	10,8	2,8	5,5
Пр. Р77	25,1	20,9	18,6	19,7	7,2	8,5

Таблица 6

*Относительное распределение массы корпуса сухогрузных СОРП  
по номенклатуре связей*

Судно	Относительная доля связи по номенклатуре, %							
	обшивки и настилы	рамный продольный набор	рамный поперечный набор	рамный набор переборок	продольный набор	поперечный набор	набор переборок	прочее
Сухогрузное судно $L = 87,05$ м	52,2	10,6	11,1	1,0	5,7	3,1	1,7	14,6
Сухогрузное судно $L = 105,8$ м	56,9	6,9	12,2	0,9	8,0	1,8	1,7	11,6
Сухогрузное судно $L = 118,4$ м	50,7	11,8	12,7	0,3	10,7	1,5	1,8	10,5
Сухогрузное судно $L = 137,8$ м	51,3	8,1	12,6	0,4	6,6	2,2	4,2	14,6
Сухогрузное судно $L = 138,5$ м	54,6	11,3	10,7	0,4	8,9	0,9	1,3	11,9
Сухогрузное судно $L = 138,9$ м	53,5	5,0	13,6	0,4	10,5	2,5	2,4	12,1

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Увеличение высоты грузового пространства позволяет повысить общую продольную прочность за счет увеличения расстояния между крайними связями эквивалентного бруса. Более рациональное распределение материала, в свою очередь, приводит к незначительному повышению металлоемкости при существенном увеличении момента сопротивления эквивалентного бруса. Этот вывод хорошо иллюстрируется данными изменения весовых показателей, представленными на рис. 3, 5.

Таблица 7

*Относительное распределение массы корпуса нефтеналивных СОРП  
по номенклатуре связей*

Судно	Относительная доля связи по номенклатуре, %							
	обшивки и настилы	рамный про- дольный на- бор	рамный поперечный набор	рамный набор переборок	продольный набор	поперечный набор	набор переборок	прочее
Нефтеналивное судно $L = 105,5$ м	55,5	8,7	14,7	2,3	6,4	0,8	1,8	9,8
Нефтеналивное судно $L = 138,1$ м	50,7	7,1	18,0	1,3	10,9	2,1	1,6	8,3
Нефтеналивное судно $L = 138,2$ м	57,2	8,3	18,0	1,1	8,2	0,9	1,1	5,2

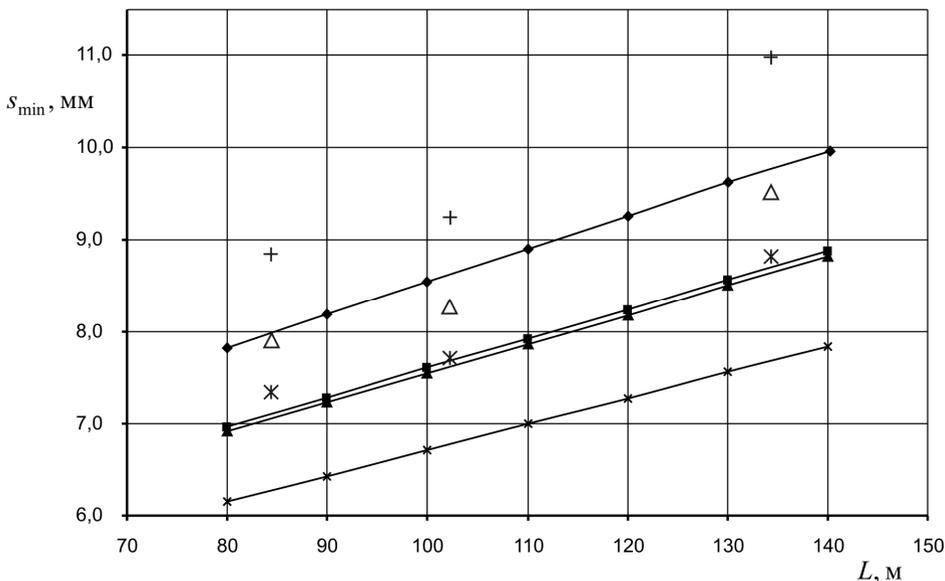
Накопленный в новых экономических условиях значительный технический и практический опыт обеспечения эффективности, надежности и безопасности ССП на этапах изменения классов, модернизаций, ремонтов, реноваций, разовых переходов, расширений районов плавания естественным образом должен был найти и нашел свое отражение при проектировании корпусов нового поколения ССП.

Назначение толщин листовых элементов, которые во многом определяют металлоемкость корпуса, в соответствии с предложенной концепцией производилось путем проверки требований к минимальным толщинам типа  $S_{\min} = (A_1 + A_2 L) \cdot \sqrt{\eta} \cdot K(a/a_0)$ , где  $A_1$ ,  $A_2$  – коэффициенты формул  $S_{\min}$  из Правил,  $\eta$  – фактор материала,  $K(a/a_0)$  – коэффициент влияния шпации,  $a$ ,  $a_0$  – принятая для основного набора и нормальная шпации и условия обеспечения устойчивости пластин при общем продольном изгибе, а также требований эксплуатационной надежности [4], долговечности по износам [6].

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

На рис. 6 приведены толщины днищевой обшивки, требуемые по условиям обеспечения устойчивости и по критерию минимальных толщин в зависимости от длины судна  $L$ , шпации  $a$ , предела текучести стали  $R_{\text{сн}}$  и класса РС.

По эксплуатационным критериям толщина обшивки не должна быть ниже 8-9 мм. Исходя из этих толщин, по данным зависимостей, указанных на рис. 6, может быть определена шпация продольного набора. Для ССП она находится, как правило, в пределах 520-560 мм.



*Рис. 6. Требуемые по критерию минимальных толщин и условию обеспечения устойчивости толщины днищевой обшивки по критерию минимальных толщин*

—◆—  $R_{\text{сн}} = 235 \text{ МПа}$ , II, ПСП —■—  $R_{\text{сн}} = 235 \text{ МПа}$ , ПСП

—▲—  $R_{\text{сн}} = 315 \text{ МПа}$ , II, ПСП —×—  $R_{\text{сн}} = 315 \text{ МПа}$ , ПСП

*По критерию устойчивости обшивки*

✱  $a = 0,50 \text{ м}$     Δ  $a = 0,55 \text{ м}$     +  $a = 0,635 \text{ м}$

В таблице 8 определены «предельные» величины пролетов  $\ell_{\text{кр}}$  продольных ребер жесткости (РЖ) для обычно применяемых в таких случаях профилей по критериям устойчивости (было принято условие обеспечения эйлеровых напряжений  $\sigma_3 = 2,6\sigma_{\text{т}}^{\text{н}}$ , где  $\sigma_{\text{т}}^{\text{н}}$  – нормативный предел текучести) и местной прочности. Под «ненапряженными» понимаются крайний пояс, или элементы эквивалентного бруса, где напряжения от общего изгиба незначительны (настил второго дна, днище на сухогрузных судах). Под «напряженным» понимается крайний пояс эквивалентного

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

бруса, где напряжения от общего изгиба значительные (днище на нефтеналивных судах, судах-площадках, железнодорожных паромках).

Решение такой задачи позволяет определить рамную поперечную шпацию. Исследования эксплуатационной надежности корпусов ССП показывают, что для условий восприятия возможных нагрузок при посадках на мель для днища и нагрузок от стенок шлюзов, причалов и льда для борта рамная поперечная шпация не должна превышать 2,0 м.

Типовые распределения массы металлического корпуса (включая надстройки и люковые закрытия) ССП нового поколения приведены в таблице 9, массы корпуса судна порожнем – в таблице 10. В качестве основной особенности следует отметить смещение нагрузки от надстройки и оборудования машинного отделения примерно на теоретическую шпацию в корму, а также сокращение собственно длины кормовой части за счет применения ВРК и уменьшенных объемов надстройки. Кроме того, с уменьшением длины  $L$  растет относительная доля нагрузки корпуса, приходящейся на среднюю часть.

Таблица 8

*Определение «предельных» пролетов  $\ell_{кр}$  продольных РЖ*

Условие	Номер полосоубульба					
	10	12	14а	14б	16а	16б
	$R_{ст} = 235\text{МПа} / R_{ст} = 315\text{МПа}$					
Устойчивость	1,75/1,55	2,27/2,00	2,80/2,47	2,84/2,51	3,34/2,95	3,37/2,98
Местная нагрузка со стороны воды (для ненапряженного пояса)	1,91/2,17	2,30/2,60	2,69/3,04	2,82/3,19	3,13/3,55	3,29/3,73
Местная нагрузка со стороны воды (для напряженного пояса)	1,59/1,80	1,91/2,17	2,24/2,53	2,35/2,66	2,61/2,95	2,74/3,10
Нагрузка от груза 10 т/м <sup>2</sup> (для ненапряженного пояса)	1,44/1,63	1,73/1,96	2,02/2,29	2,12/2,40	2,36/2,67	2,47/2,80

Увеличение длины грузового пространства на проектах МИБ (005RST01, 006RSD02, 005RSD03, 006RSD05, 007RSD07, RST22) было реализовано за счет применения впервые в отечественной практике (на грузовых судах) в качестве движительно-рулевого комплекса полноповоротных винто-рулевых колонок, что позволило сократить длину машинного отделения примерно на 20 %, отказаться от ахтерпика и румпельного отделения, а также обеспечить требуемую управляемость и ходкость в стесненных условиях, сократить затраты на монтаж и предполагаемые затраты на ремонт и обслуживание. Выбор ВРК для проектов МИБ производился на основании специальных стоимостного, массо-габаритного и риск-ориентированного исследований в сравнении с обычными одно- и двухвальными модификациями проектов.

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Таблица 9

*Распределение нагрузки металлического корпуса  
(с учетом надстроек, рубки и люковых крышек для сухогрузов), %*

Проект	Теоретическая шпация									
	20	19	18	17	16	5-15	4	3	2	1
Сухогрузное судно <i>L</i> = 87,05 м	7,59	3,99	6,08	5,71	4,58	4,82	4,67	5,93	4,34	3,89
Сухогрузное судно <i>L</i> = 105,8 м	7,28	4,76	4,22	5,12	5,55	5,23	5,34	4,92	2,64	2,48
Сухогрузное судно <i>L</i> = 118,4 м	5,18	6,59	7,24	6,99	4,23	4,55	4,65	5,33	5,84	3,77
Сухогрузное судно <i>L</i> = 137,4 м	6,69	6,20	6,81	4,77	4,48	4,73	5,70	4,58	4,66	3,97
Сухогрузное судно <i>L</i> = 137,8 м	8,00	7,27	7,29	4,72	4,30	4,42	5,18	4,53	5,35	4,53
Сухогрузное судно <i>L</i> = 138,5 м	5,94	6,55	6,69	5,14	4,43	4,67	5,17	5,49	4,52	3,88
Сухогрузное судно <i>L</i> = 138,9 м	4,25	5,28	5,67	6,46	5,64	4,82	4,65	6,45	4,88	3,71
Нефтеналивное судно <i>L</i> = 105,5 м	5,76	8,42	8,17	8,57	4,87	4,19	4,02	5,17	4,78	4,28
Нефтеналивное судно <i>L</i> = 136,2 м	2,86	12,83	11,60	4,52	3,80	4,03	3,68	4,66	5,02	6,53
Нефтеналивное судно <i>L</i> = 138,1 м	5,52	8,73	8,18	4,93	4,12	4,46	4,77	4,80	5,79	3,37
Нефтеналивное судно <i>L</i> = 138,2 м	4,70	5,80	6,51	7,15	5,12	4,66	4,21	5,45	5,33	4,08

Увеличение высоты грузового пространства позволяет повысить общую продольную прочность за счет увеличения расстояния между крайними связями эквивалентного бруса. Более рациональное распределение материала, в свою очередь, приводит к незначительному повышению металлоемкости при существенном увеличении момента сопротивления эквивалентного бруса.

Сопоставление удельной грузоподъемности спроектированных МИБ и существующих ССП приведено на рисунках 7-10. Увеличение вместимости грузовых помещений судов, спроектированных МИБ, сопровождается увеличением удельной грузоподъемности на осадках, соответствующих условиям ВВП России.

Для определения удельной грузоподъемности сухогрузных СОРП при осадке по ЛГВЛ можно рекомендовать зависимость

$$\mu_2 = 1,0014 + 3,57 \cdot 10^{-5} LBD', \text{ м}^3/\text{т}.$$

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Таблица 10

*Распределение нагрузки судна порожнем, %*

Проект	Теоретическая шпация									
	20	19	18	17	16	5-15	4	3	2	1
Сухогрузное судно $L = 87,05$ м	12,74	9,48	8,84	6,07	4,33	3,86	3,97	4,55	5,48	2,11
Сухогрузное судно $L = 105,8$ м	7,25	13,61	14,05	8,53	4,93	3,26	3,26	3,73	4,86	3,98
Сухогрузное судно $L = 118,4$ м	8,51	10,32	11,41	6,32	3,87	4,00	3,88	3,96	4,41	3,68
Сухогрузное судно $L = 137,4$ м	12,22	10,33	10,52	4,02	3,72	3,91	4,25	3,68	3,89	4,27
Сухогрузное судно $L = 137,8$ м	13,49	6,87	7,03	4,50	4,22	4,30	4,55	4,23	4,20	3,55
Сухогрузное судно $L = 138,5$ м	13,87	8,68	11,28	4,93	3,64	3,72	4,04	4,22	3,61	4,27
Сухогрузное судно $L = 138,9$ м	6,32	7,57	6,47	6,75	5,40	4,49	4,33	5,38	4,35	4,09
Нефтеналивное судно $L = 105,5$ м	5,87	7,63	9,10	10,91	6,80	4,26	3,42	3,45	3,83	2,68
Нефтеналивное судно $L = 136,2$ м	9,94	14,99	13,26	3,83	3,33	3,51	3,24	3,96	4,13	4,59
Нефтеналивное судно $L = 138,1$ м	11,35	10,59	10,44	4,31	3,66	3,83	4,08	3,80	5,55	4,27
Нефтеналивное судно $L = 138,2$ м	11,15	9,64	11,13	5,27	3,78	3,94	4,32	4,41	4,19	2,39

Для определения удельной грузоподъемности сухогрузных СОРП при осадке в реке (3,60 м) можно рекомендовать зависимость  $\mu_1 = 1,3915 + 5,27 \cdot 10^{-5} LBD'$ , м<sup>3</sup>/т.

Для определения спецификационной плотности нефтеналивных СОРП при осадке по ЛГВЛ можно рекомендовать зависимость  $\rho_2 = 0,7401 + 1,47 \cdot 10^{-5} LBD'$ , т/м<sup>3</sup>.

Для определения спецификационной плотности нефтеналивных СОРП при осадке в реке (3,60 м) можно рекомендовать зависимость  $\rho_1 = 0,8806 + 1,48 \cdot 10^{-5} LBD'$ , т/м<sup>3</sup>.

Некоторое повышение энерговооруженности судов (см. рисунки. 11-13), спроектированных МИБ, позволяет, прежде всего, увеличить скорость при движении на волнении, что вполне допустимо по условиям прочности их корпусов, приводит к сокращению потерь времени в ожидании благоприятной погоды в сравнении с существующими ССП и в конечном итоге, существенно повышает их экономическую эффективность.

### ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Для определения мощности главных двигателей была получена аналитическая зависимость  $N_{\text{МДМ}} / \Delta = 0,288 - 3,7 \cdot 10^{-6} LBD'$ , кВт/т, которая обеспечивает получение эксплуатационной скорости  $V_s \approx 10,5$  узлов. При этом отклонение от зависимости было зафиксировано только для одного из новых проектов, где по решению судовладельца были выбраны главные двигатели с избыточной мощностью.

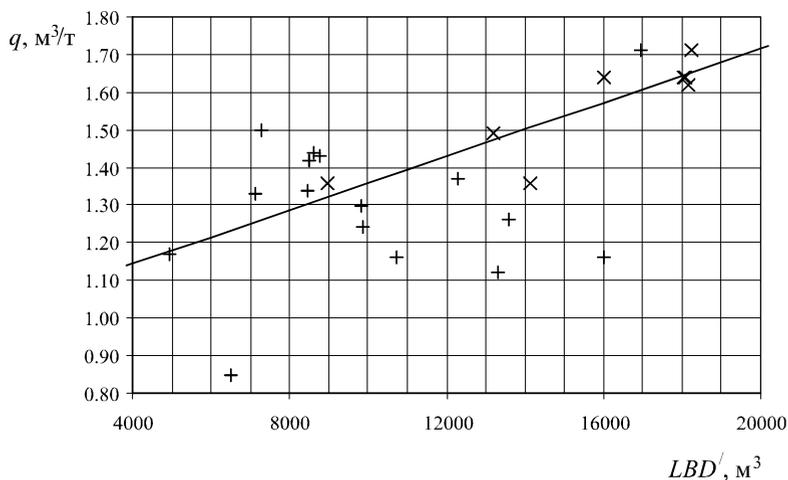


Рис. 7. Удельная грузопместимость сухогрузных СОРП  
(при осадке по ЛГВЛ)

x – проекты МИБ; + – существующие суда

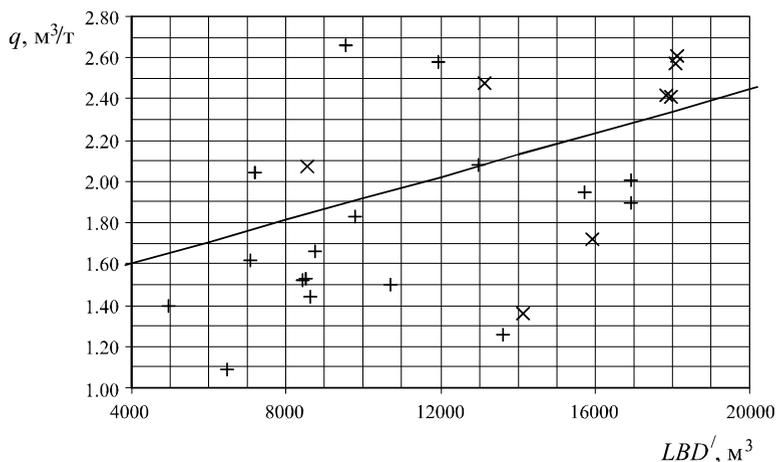
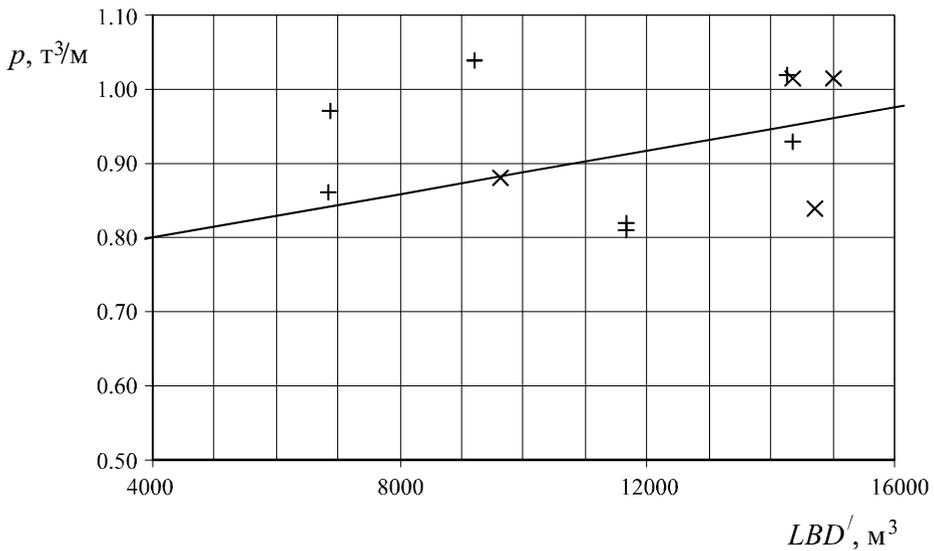


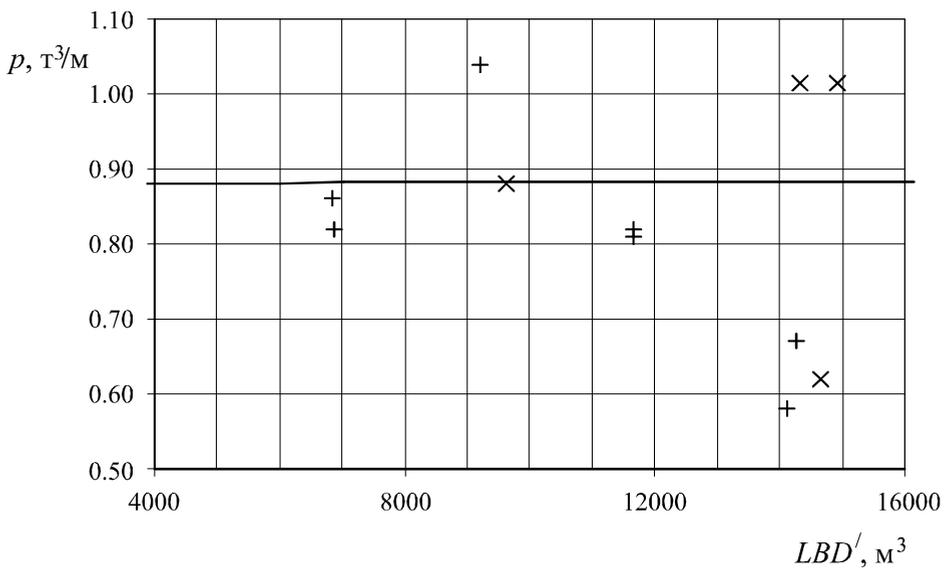
Рис. 8. Удельная грузопместимость сухогрузных СОРП  
(в реке при осадке 3,60 м)

x – проекты МИБ; + – существующие суда

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

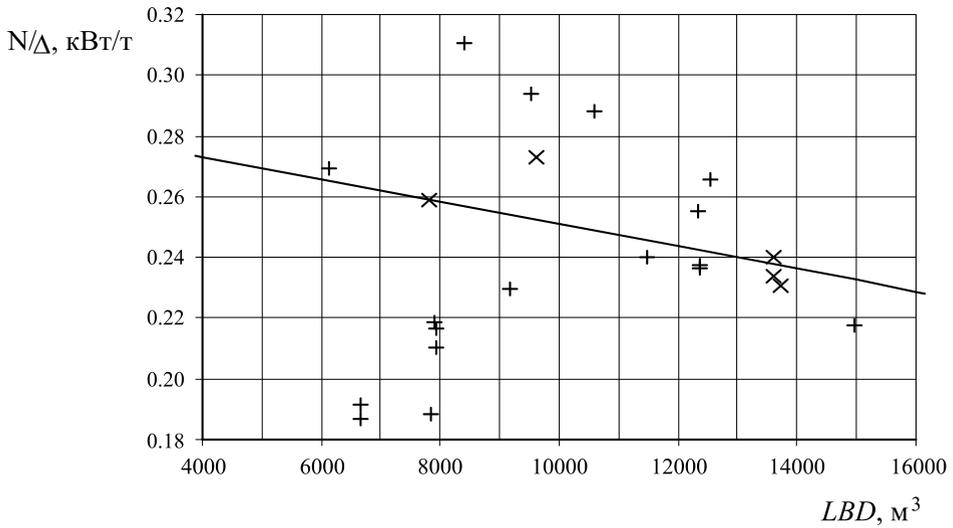


*Рис. 9. Спецификационная плотность нефтеналивных СОРП  
(при осадке по ЛГВЛ)  
x – проекты МИБ; + – существующие суда*

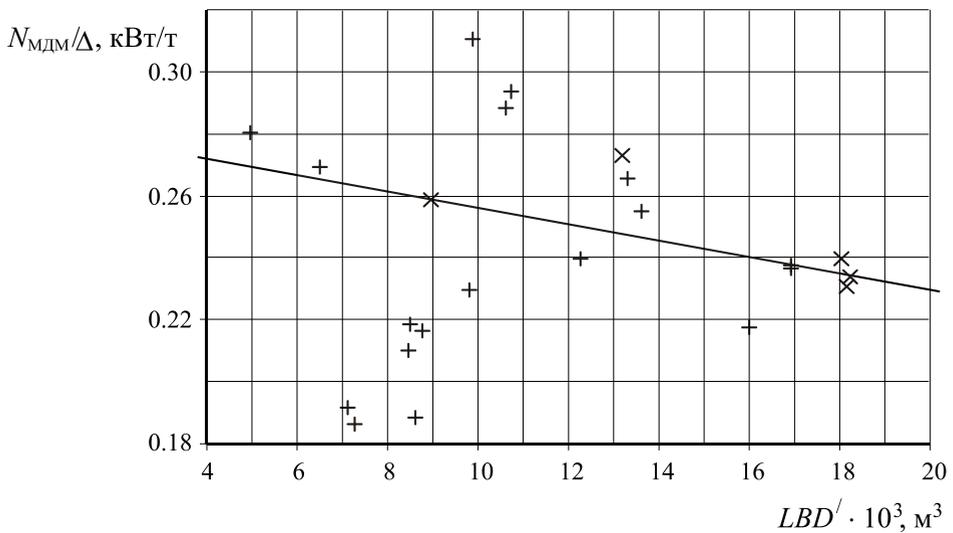


*Рис. 10. Спецификационная плотность нефтеналивных СОРП  
(в реке при осадке 3,60 м)  
x – проекты МИБ; + – существующие суда*

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

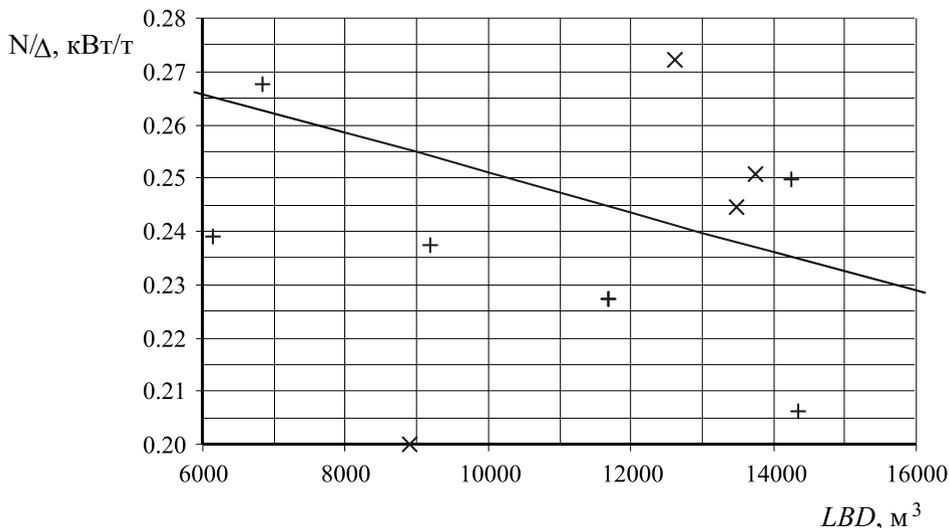


*Рис. 11. Энерговооруженность сухогрузных СОРП  
(без учета приведенной высоты борта)  
x – проекты МИБ; + – существующие суда*



*Рис. 12. Энерговооруженность сухогрузных СОРП  
x – проекты МИБ; + – существующие суда*

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**



*Рис. 13. Энерговооруженность нефтеналивных СОРП  
(без учета приведенной высоты борта)  
x – проекты МИБ; + – существующие суда*

**Заключение.** В результате исследований были уточнены зависимости для проектирования корпусов грузовых ССП нового поколения с целью их использования на стадии предварительного проектирования.

Полученные результаты и принципы легли в основу вновь разработанных в 2005-2010 годах Морским Инженерным Бюро проектов ССП и отражают современные тенденции в проектировании судов рассматриваемого класса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров Г.В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска. – СПб.: Судостроение, 2007. – 384 с.
2. Егоров Г.В. Принципы создания нового поколения транспортных судов ограниченных районов плавания // Сборник трудов 7 междунар. конф. по судостроению, судоходству, оборудованию морских платформ и обеспечивающих их работу плавсредств, морская техника для освоения океана и шельфа «Нева 2003». – СПб, 2003. – С. 29-32.

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ  
СМЕШАННОГО РЕКА-МОРЕ ПЛАВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

---

3. Егоров Г.В. Основные факторы, влияющие на надежность корпусов судов ограниченного района плавания // Прочность и техническая эксплуатация корпусов судов: Сб. научн. тр. БГАРФ. – Калининград, 1998. – Вып. 27. – С. 73-80.
4. Егоров Г.В. Учет требований эксплуатационной прочности при назначении толщин корпусов судов внутреннего плавания системы Дунай-Майн-Рейн // Сб. научн. тр. УГМТУ. – Николаев: УГМТУ, 2000. – № 3(369). – С. 32-43.
5. Егоров Г.В. Особенности конструкций корпусов судов ограниченных районов плавания нового поколения // Вопросы динамической прочности, вибрации и безопасности эксплуатации корпусов судов: Труды ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова. – 2005. – Вып. 21(305). – С. 126-143.
6. Егоров Г.В. Оценка расчетных скоростей износа корпусов судов смешанного плавания // Труды НТК по СМК памяти акад. Ю.А. Шиманского. – СПб: ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова, 2006. – С. 15-17.
7. Егоров Г.В. Реклассифицированные суда смешанного плавания // Вісник ОНМУ. – Одесса: ОНМУ, 2010. – Вип. 29. – С. 3-16.
8. Егоров Г.В. Основы проектирования корпусов судов смешанного река-море плавания // Морской вестник. – 2010. – № 4 (36). – С. 67-71.

Надійшла 18.04.11

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, головн. наук. співпрацівник Морського інженерного бюро, наук. консультант **В.В. Козляков.**

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУТОГО СТЕРЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**

*Роботу присвячено задачам розрахунку підводних трубопроводів, гнучких шлангів та кабелів, що мають широке застосування в океанотехніці. Ці елементи представляють собою стержні з малою жорсткістю, які працюють в умовах складного вигину. На базі методу зрощуваних асимптотичних розкладань побудовано аналітичне рішення лінійних та нелінійних задач про складний згиб стержня, які придодні при скіль завгодно малому значенні його згибної жорсткості.*

*The present operation is caused by tasks of calculation of underwater pipe lines, flexible tubes and cables which have wide application in an ocean engineering. On the basis of a method of spliced asymptotic decomposition analytical decisions of linear and nonlinear tasks on a rod compound bending, suitable are constructed at an arbitrarily small value of its rigidity.*

*Настоящая работа посвящена задачами расчета подводных трубопроводов, гибких шлангов и кабелей, которые имеют широкое применение в океанотехнике. Эти элементы представляют собой стержни с малой изгибной жесткостью работающие в условиях сложного изгиба. Аналитические решения линейной и нелинейной задач о сложном изгибе стержня получено методом сращиваемых асимптотических разложений и пригодно при сколь угодно малом значении изгибной жесткости.*

**Ключевые слова:** *подводные трубопроводы, гибкие шланги и кабели, океанотехника, стержни с малой изгибной жесткостью, метод сращиваемых асимптотических разложений, линейная и нелинейная задача о сложном изгибе.*

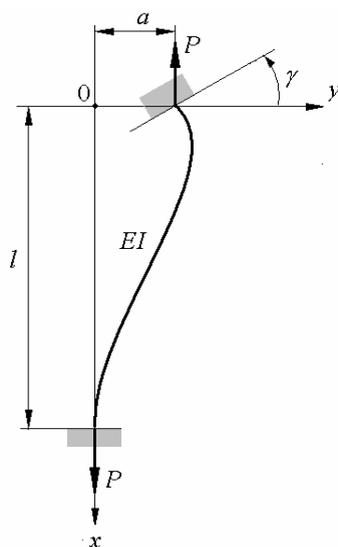
**Постановка задачи.** Рассмотрим призматический стержень длины  $l$  находящийся под действием постоянной растягивающей силы  $P$  (рис. 1). Стержень имеет изгибную жесткость  $EI$  и жестко зашпемлен на обоих опорах. Пусть одна из опор получила поперечное смещение  $a$ , а также повернулась на угол  $\gamma$ . Требуется определить элементы изгиба стержня.

Предполагая, что перемещение и угол поворота верхней опоры малы, изгиб стержня с учетом влияния постоянной осевой силы описывается линейным дифференциальным уравнением

$$y^{IV}(x) - \beta^2 \cdot y''(x) = 0, \quad (1)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{P}{EI}}. \quad (2)$$

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУТОГО СТРЕЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**



*Рис. 1. Сложный изгиб стержня при смещении и повороте опор*

Решение дифференциального уравнения должно быть подчинено граничным условиям на опорах

$$x = 0: \quad y(0) = a; \quad y'(0) = \gamma; \quad (3)$$

$$x = l: \quad y(l) = 0; \quad y'(l) = 0. \quad (4)$$

Данная линейная задача является классической и ее решение может быть найдено, используя известные методы, изложенные, например в монографии П.Ф. Папковича [2], в справочнике [3] и в ряде других источников. Общее решение уравнения (1) можно искать в виде

$$y(x) = C_0 + C_1 \beta x + C_2 \sinh \beta x + C_3 \cosh \beta x. \quad (5)$$

Дифференцируя (5) и используя граничные условия, получаем следующие формулы для постоянных  $C_i$

$$C_0 = \frac{(\cosh v - 1)(a \cosh v + (\gamma / \beta) \sinh v) - (\sinh v - v)(a \sinh v + (\gamma / \beta) \cosh v)}{2(1 - \cosh v) + v \sinh v},$$

$$C_1 = \frac{(\cosh v - 1)(a \sinh v + (\gamma / \beta) \cosh v) - \sinh v(a \cosh v + (\gamma / \beta) \sinh v)}{2(1 - \cosh v) + v \sinh v},$$

$$C_2 = \frac{\gamma}{\beta} - C_1; \quad C_3 = a - C_0 \quad (6)$$

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУТОГО СТРЕЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**

---

В этих формулах безразмерный параметр гибкости

$$v = \beta \cdot l. \quad (7)$$

Данное решение имеет интересную особенность, которая свойственна многим задачам такого типа. Если изгибная жесткость стержня мала или длина стержня велика, то параметр  $v$  становится очень большим, что приводит к «переполнению» и потере точности при вычислении гиперболических функций в (6). Кроме того, формулы (5) требуют вычисления малой разности больших величин, которые становятся тем большими, чем меньше изгибная жесткость стержня. Это приводит к тому, что при практическом расчете по этим формулам удовлетворение всем граничным условиям оказывается проблематичным. В этом можно убедиться, если рассмотреть предельное поведение постоянных (6) при больших значениях параметра  $v \rightarrow \infty$

$$C_0 \rightarrow \left( \frac{v-1}{v-2} \right) \left( a + \frac{\gamma}{\beta} \right), \quad C_1 \rightarrow -\frac{1}{v-2} \left( a + \frac{\gamma}{\beta} \right) \quad (8)$$

и подставить эти формулы в (5).

Таким образом, точное решение линейной задачи оказывается непригодным для стержней малой изгибной жесткости. Эта ограниченность имеет четкую физическую интерпретацию, которая для случая изгиба растянутого стержня сосредоточенной силой была указана П.Ф. Папковичем [2]: при уменьшении изгибной жесткости упругая линия стержня все более приближается к форме абсолютно гибкой нити (прямой линии), в которую она полностью переходит при  $EI = 0$ . Использование гиперболических функций для описания прямой линии является неэффективным. Только в предельном случае  $EI = 0$ , когда форма стержня точно описывается моделью абсолютно гибкой нити, экспоненциальные члены в выражении (5) полностью уничтожаются. Однако такая модель сама по себе является бесполезной, поскольку не дает возможности вычислить элементы изгиба стержня вблизи опор. Поэтому для расчета деформации весьма гибкого стержня более целесообразно применить другой метод.

Нетрудно уловить аналогию между рассматриваемой задачей и плоским течением вязкой жидкости между двумя параллельными стенками: в обоих случаях важные особенности задачи вблизи границ области являются источником возмущения некоторого основного решения. Данная аналогия подсказывает, что следует искать не точное, а асимптотическое решение задачи, которое, подобно теории пограничного слоя, было бы одинаково эффективно и вблизи и вдали от границ области. Обратимся к построению такого решения, следуя методу сращиваемых асимптотических разложений; подробное описание этого метода можно найти в книге Найфе [1].

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУТОГО СТЕРЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**

---

**Асимптотическое решение линейной задачи.** Рассмотрим уравнение (1) при  $\beta \rightarrow \infty$ , переписав его в виде

$$\frac{1}{\beta^2} y^{IV}(x) - y''(x) = 0. \quad (9)$$

Для очень гибкого стержня первым членом можно пренебречь и уравнение может быть упрощено

$$y''(x) = 0. \quad (10)$$

Это уравнение соответствует модели абсолютно гибкой нити, и его общее решение есть

$$y(x) = C_0 + C_1 x, \quad (11)$$

где постоянные  $C_0$  и  $C_1$  неизвестны. Понятно, что решение (11) не может применяться по всей длине стержня; оно описывает форму стержня лишь в той области, где влияние его изгибной жесткости на форму упругой линии пренебрежимо мало, т.е. вдали от опор. Будем называть эту область «внешней зоной» и обозначать индексом «1», а выражение (11) называть «внешним» решением. Поскольку основной интерес представляет изгиб стержня вблизи опор, мы не можем ограничиться только внешней зоной; необходимо также рассмотреть области в непосредственной близости от верхней и нижней опор стержня, которые будем называть внутренней зоной «2» и внутренней зоной «3», соответственно (рис.2). Заметим, что подразделение на зоны не является четко определенным; определен лишь порядок расстояний во внутренних зонах, который предполагается малым.

Во внутренней зоне «2» стержень следует рассматривать как полубесконечный, поскольку порядок расстояний мал и для наблюдателя находящегося вблизи верхней опоры нижняя опора стержня как бы «отодвинута» на бесконечность (это интуитивное положение может быть показано строго путем введения так называемых растянутых координат). Поэтому следует использовать полное уравнение изгиба (1), общее решение которого на полубесконечном интервале  $x > 0$  имеет вид

$$y_2(x) = A_0 + A_1 \beta x + A_2 e^{-\beta x} + A_3 e^{\beta x}. \quad (12)$$

Поскольку экспоненциальное возрастание прогиба при  $x \rightarrow \infty$  не соответствует физическому смыслу задачи, можно сразу положить  $A_3 = 0$ . Используя граничные условия (3), две из трех оставшихся постоянных могут быть определены и внутреннее решение, справедливое вблизи верхней опоры, будет

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУГОГО СТРЕЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР

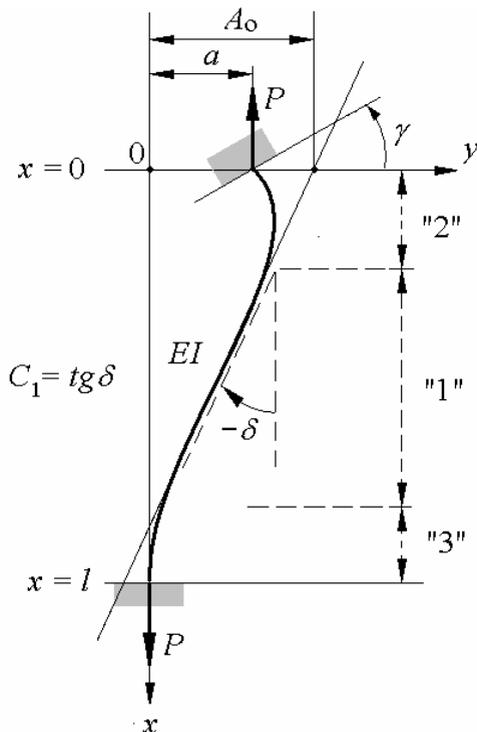


Рис. 2. Внешняя и внутренние зоны по длине стержня

$$y_2(x) = A_0(1 - e^{-\beta x}) + (a\beta + \gamma - A_0\beta)x + ae^{-\beta x}. \quad (13)$$

Здесь постоянная  $A_0$  попрежнему неизвестна.

Аналогично можно рассмотреть внутреннюю зону «3» вблизи нижней опоры стержня. В этом случае общее решение уравнения (1) на полубесконечном интервале  $x < l$  запишем в виде

$$y_3(x) = B_0 + B_1\beta(l-x) + B_2e^{-\beta(l-x)} + B_3e^{\beta(l-x)}. \quad (14)$$

Положив  $B_3 = 0$  и, используя граничные условия (4), получим внутреннее решение, справедливое вблизи нижней опоры

$$y_3(x) = B_0[1 - \beta(l-x)] - B_0e^{-\beta(l-x)}. \quad (15)$$

Здесь постоянная  $B_0$  неизвестна. Итак, одно внешнее решение (11) и два внутренних решения (13), (15) найдены, но содержат четыре неизвестные постоянные. Они могут быть найдены путем сращивания

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУТОГО СТРЕЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**

этих решений, т.е. сопоставления их асимптотических разложений в общей области определения. Запишем асимптотические выражения для найденных решений

$$y_1(x) = C_0 + C_1x; \text{ при } x \rightarrow 0 \text{ и } x \rightarrow l, \quad (16)$$

$$y_2(x) \rightarrow A_0 + (\gamma - A_0\beta + a\beta)x; \text{ при } x \rightarrow \infty, \quad (17)$$

$$y_3(x) \rightarrow B_0[1 - \beta(l - x)]; \text{ при } (l - x) \rightarrow \infty. \quad (18)$$

Произведем сращивание, приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях  $x$

$$\begin{aligned} C_0 &= A_0; \quad B_0(1 - vl) = A_0, \\ C_1 &= \gamma - A_0\beta + a\beta; \quad B_0\beta = C_1. \end{aligned} \quad (19)$$

Этих четырех уравнений достаточно чтобы определить четыре постоянные

$$C_0 = A_0 = \frac{v-1}{v-2} \left( a + \frac{\gamma}{\beta} \right), \quad (20)$$

$$C_1 = -\frac{\beta}{v-2} \left( a + \frac{\gamma}{\beta} \right), \quad (21)$$

$$B_0 = -\frac{1}{v-2} \left( a + \frac{\gamma}{\beta} \right). \quad (22)$$

Таким образом, решения в трех областях по длине стержня задаются формулами (11), (13), (15), и постоянными (20)-(22). Очевидно, что внутренние решения «2» и «3» содержат в себе внешнее решение «1», и поэтому достаточно пользоваться только формулами (13) и (15), в зависимости от того, какая из двух опор является ближайшей к рассматриваемому сечению стержня.

Все элементы изгиба стержня могут быть теперь легко вычислены. Например, изгибающие моменты вблизи верхней и нижней опоры, соответственно, задаются выражениями

$$M_2(x) = EI \cdot y_2''(x) = -\frac{P}{v-2} \left( (v-1)\frac{\gamma}{\beta} + a \right) \cdot e^{-\beta x}, \quad (23)$$

$$M_3(x) = EI \cdot y_3''(x) = \frac{P}{v-2} \left( \frac{\gamma}{\beta} + a \right) \cdot e^{-\beta(l-x)}. \quad (24)$$

Отсюда видно, что изгибающие моменты принимают максимальные значения на опорах и убывают по экспоненциальному закону на рас-

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУТОГО СТРЕЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**

стоянии от опор. Поэтому на значительной части своей длины стержень не подвержен изгибу и его упругая линия представляет собой прямую линию. Однако эта прямая принципиально отличается от модели абсолютно гибкой нити, как своим наклоном, так и координатами точек, в которых она примыкает к опорам. Эти элементы определяются характеристиками изгиба стержня вблизи опор, который таким образом оказывается полностью учтенным. Геометрический смысл коэффициентов (20)-(22) показан на рис. 2.

**Пример.** Определить элементы изгиба буровой трубы, вызванного смещением и креном бурового судна. Труба предполагается жестко заземленной на уровне дна моря (подводной скважины) и на уровне днища бурового судна, и находится под действием постоянной продольной силы 1100 кН. Характеристики задачи и вычисления приведены таблице 1. В данном случае параметр  $\nu$  настолько велик, что использование линейного решения (5), (6) невозможно в связи с «переполнением» при вычислении гиперболических функций. Понятно, что труба испытывает максимальный изгибающий момент в сечении при верхней опоре, который может быть вычислен по формуле (23).

Таблица 1

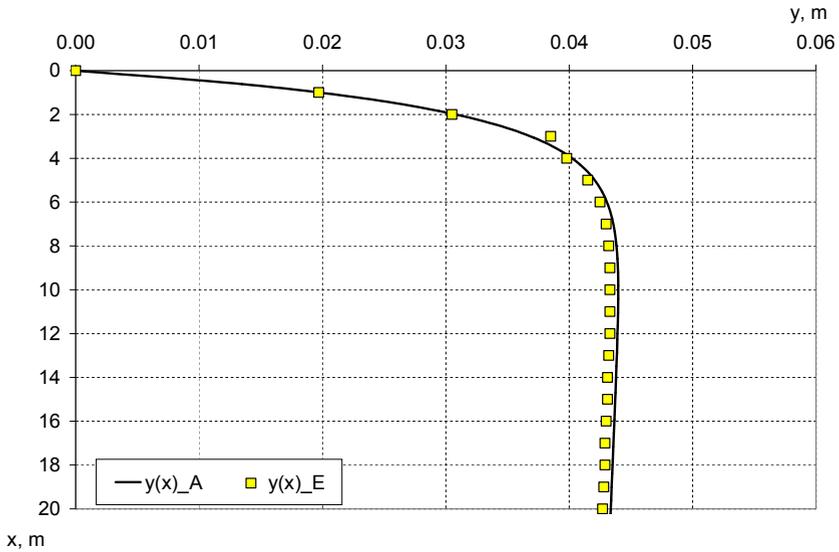
Задача об изгибе буровой трубы

Параметр	Обозначение	Размерность	Величина
<b>Исходные данные</b>			
Длина трубы	$l$	м	613,000
Наружный диаметр	$D$	мм	177,80
Толщина стенки	$t$	мм	8,38
Модуль упругости	$E$	кПа	200 $10^3$
Продольная сила	$P$	кН	1100
Поперечное смещение опоры	$a$	м	3,0
Угол поворота	$\gamma$	град	1,5
<b>Вычисления</b>			
Изгибная жесткость трубы	$EI$	кПа м <sup>4</sup>	3,21 $10^3$
Параметр	$\beta$	1/м	0,5855
Параметр	$\nu = \beta \cdot l$	-	358,93
Максим. изгибающий момент (23)	$M$	кН м	-58,56

На рис. 3 показана эпюра изгибающего момента вблизи верхней опоры, рассчитанная по формуле (23) для случая отсутствия смещения судна (только крен), а также результат аналогичного расчета по МКЭ по программе STRAND7. В последнем случае стержень был разбит на 613 элементов, каждый длиной 1 м. Очевидно, что деформация изгиба локализована в пределах 10 метров от верхней опоры, в то время как на остальной части своей длины труба практически не изгибается.

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУГОГО СТРЕЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР

а) упругая линия



б) изгибающий момент

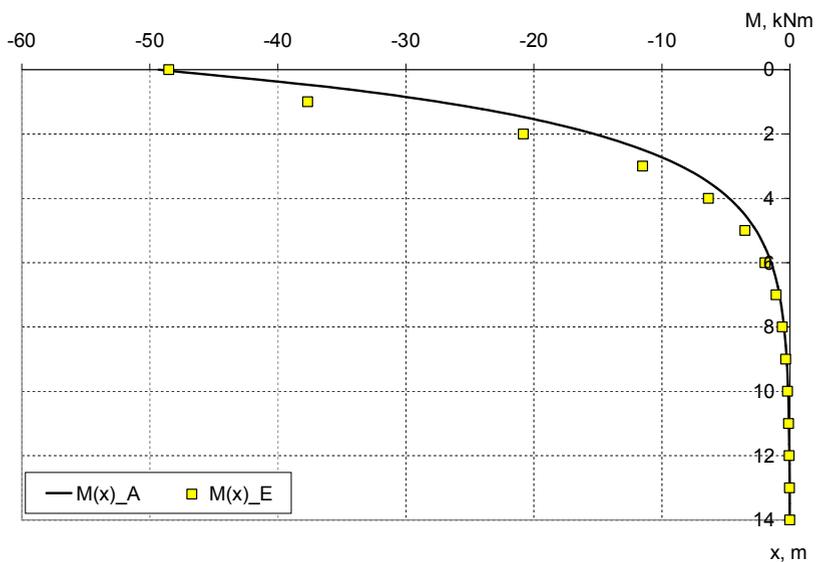
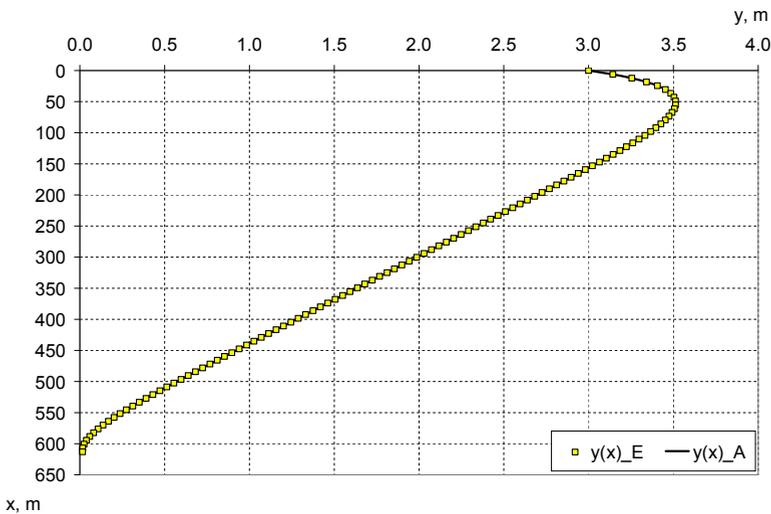


Рис. 3. Элементы изгиба вблизи верхнего сечения буровой трубы по асимптотическому решению (А) и расчет по программе STRAND7 (Е) при крене бурового судна

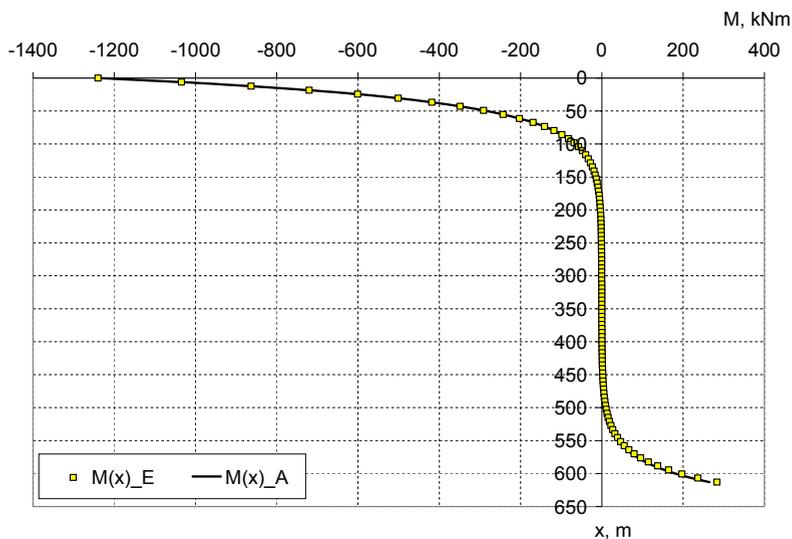
**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУТОГО СТРЕЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**

На рис. 4 приведено сопоставление точного и асимптотического решений для трубы с гораздо большей изгибной жесткостью  $EI = 1,26 \cdot 10^6$  кПа м<sup>4</sup>. В этом случае значения параметров таковы ( $\beta = 0,0296$  и  $\nu = 18,11$ ), что решение по формулам (5), (6) может быть вычислено в электронной таблице. Точное и асимптотическое решения дают практически одинаковые результаты.

*а) упругая линия*



*б) изгибающий момент*



*Рис. 4. Сопоставление точного (E) и асимптотического (A) решений для сложного изгиба буровой трубы при смещении и крене судна*

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**

**Асимптотическое решение нелинейной задачи.** Решение линейной задачи, найденное выше асимптотическим методом, является простым и более удобным, чем ее точное решение. Преимуществом асимптотического метода является также и то, что он может быть использован для получения замкнутых решений нелинейных задач, для которых точные аналитические решения либо имеют гораздо более сложный вид, либо вообще невозможны. Ряд нелинейных задач изгиба упругих стержней, допускающих точные решения, исследован в книге Frisch-Ray [5].

Рассмотрим ту же задачу об изгибе стержня, не накладывая никаких ограничений на величину перемещения опоры и степень деформации стержня. При этом будем по-прежнему предполагать материал стержня упругим и подчиняющимся закону Гука. Предположим также, что стержень может скользить в опорах, так что при поперечном смещении верхней опоры пролет  $h$  остается постоянным, а длина стержня  $l$  изменяется (рис. 5).

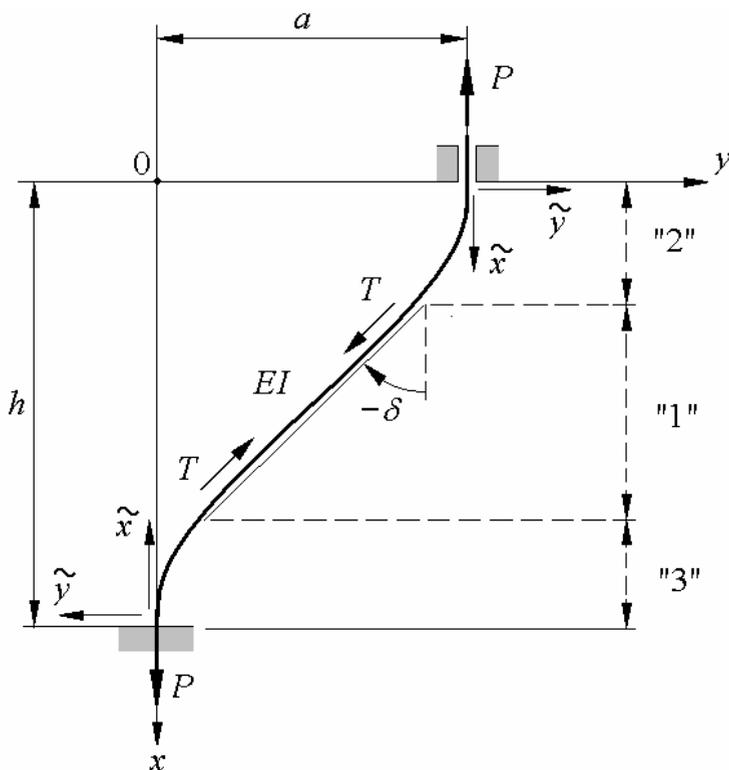


Рис. 5. Сложный изгиб стержня при смещении опоры – нелинейная задача

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУГОГО СТРЕЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**

---

Найдем асимптотическое решение этой нелинейной задачи для очень гибкого стержня, предполагая его изгибную жесткость малой, т.е.

$$EI = O(\varepsilon^2), \text{ или, что тоже самое } - \varepsilon \cdot \beta = O(1). \quad (25)$$

Здесь  $\varepsilon$  – малый линейный размер задачи. При этом ограничимся только поперечным смещением верхней опоры, предполагая ее угол поворота равным нулю. Учет угла поворота незначительно усложняет выкладки, однако не вносит никаких принципиальных затруднений в ход решения.

Аналогично линейному решению рассмотрим три зоны: внешнюю «1» вдали от опор и две внутренних «2» и «3». Как и ранее, во внешней зоне форма стержня описывается прямой линией, наклоненной под конечным углом  $\delta$  к вертикали, так что

$$y_1(x) = x \cdot \operatorname{tg} \delta + C_0. \quad (26)$$

Постоянная  $C_0$  и угол  $\delta$  наклона упругой оси стержня неизвестны.

Для рассмотрения деформации стержня во внутренней зоне «2» введем систему «растянутых» координат, связанную с верхней опорой (рис. 5)

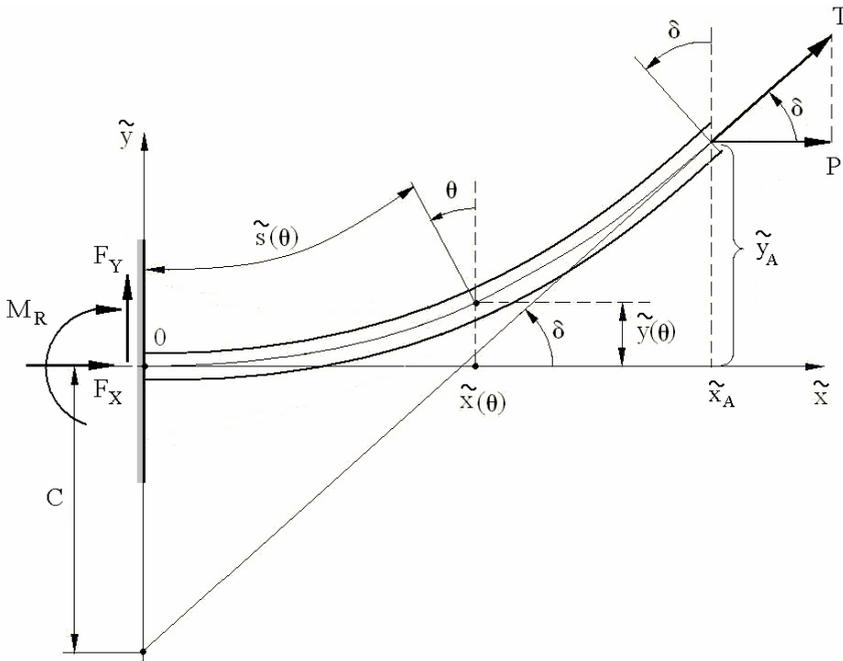
$$\tilde{x} = x / \varepsilon ; \quad \tilde{y} = (y - a) / \varepsilon . \quad (27)$$

Здесь параметр  $\varepsilon$  определяет масштаб внутренней зоны. В растянутой системе координат  $(\tilde{x}, \tilde{y})$  нижняя опора «отодвинута» на большое расстояние так, что особенности деформации стержня вблизи нижней опоры несущественны, и поэтому стержень представляется полубесконечным. Вдали от верхней опоры он находится под действием неизвестной осевой силы  $T$ , действующей под углом  $\delta$  и связанной с продольной силой  $P$  соотношением

$$T = P / \cos \delta . \quad (28)$$

Следуя общему подходу, нужно найти решение для изгиба стержня во внутренней зоне, предполагая величину угла  $\delta$  известной, после чего срастить асимптотику этого решения с внешним решением (26). Это позволит вычислить все неизвестные величины, определяющие деформированное состояние стержня.

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУТОГО СТРЕЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**



*Рис. 6. Изгиб стержня во внутренней зоне*

Изгиб стержня во внутренней зоне будем описывать координатами  $\tilde{x}(\theta)$ ,  $\tilde{y}(\theta)$  и длиной дуги его нейтральной оси  $\tilde{s}(\theta)$  как функциями угла наклона сечения к вертикали  $\theta$ . Для удобства анализа, предположим сначала, что осевая сила  $T$  приложена в некоторой точке нейтральной оси  $(\tilde{x}_A, \tilde{y}_A)$  вдали от опоры. Тогда проекции реакции и момента в опорном сечении записываются в виде

$$F_X = -P; \quad F_Y = -P \cdot \operatorname{tg} \delta; \quad \tilde{M}_R = P(\tilde{x}_A \cdot \operatorname{tg} \delta - \tilde{y}_A). \quad (29)$$

Поэтому изгибающий момент в произвольном сечении стержня равен

$$\frac{EI}{\varepsilon^2} \frac{d\theta}{d\tilde{s}} = \tilde{M}_R - F_X \tilde{y} + F_Y \tilde{x} = P(\tilde{y} - \tilde{x} \cdot \operatorname{tg} \delta) - PC. \quad (30)$$

Введенная здесь постоянная  $C$ , которую в дальнейшем будем называть «постоянной закрепления», определяется формулой

$$C = \tilde{y}_A - \tilde{x}_A \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (31)$$

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУТОГО СТРЕЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**

Последнее уравнение описывает линию действия силы  $T$  в переменных  $\tilde{x}_A$  and  $\tilde{y}_A$ , причем постоянная закрепления определяет точку пересечения этой линии с осью  $\tilde{y}$ . Заметим, что выражение для изгибающего момента (30) записано во внутренних растянутых координатах, в которых изгибная жесткость стержня  $(EI)/\varepsilon^2$  является конечной величиной. Дифференцируя (30) и используя параметр гибкости  $(\varepsilon\beta)$  во внутренних переменных, имеем

$$\frac{d^2\theta}{d\tilde{s}^2} = (\varepsilon\beta)^2 (\sin\theta - \cos\theta \cdot \operatorname{tg}\delta). \quad (32)$$

Следуя классическому подходу (Тимошенко [4]), умножим выражение (32) на  $(d\theta/d\tilde{s})$  и проинтегрируем от 0 до  $s$ . Из выражения (30) следует, что при левом пределе интегрирования нужно положить

$$\left(\frac{d\theta}{d\tilde{s}}\right)_0 = -(\varepsilon\beta)^2 C. \quad (33)$$

Поэтому после интегрирования и преобразований получаем следующее выражение для длины дуги нейтральной оси стержня

$$\tilde{s}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}(\varepsilon\beta)} \int_0^\theta \frac{dt}{\sqrt{1 + \frac{(\varepsilon\beta)^2 C^2}{2} - \cos\theta - \operatorname{tg}\delta \sin\theta}}. \quad (34)$$

Используя подстановку  $t = 2\psi + \delta$ , этот интеграл может быть приведен к более удобному виду

$$\tilde{s}(\theta) = \frac{q\sqrt{\cos\delta}}{(\varepsilon\beta)} \int_{-\delta/2}^{(\theta-\delta)/2} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - q^2 \cos^2\psi}}. \quad (35)$$

Здесь введен новый параметр  $q$ , связывающий постоянную закрепления  $C$  и угол  $\delta$

$$q = \sqrt{\frac{2}{1 + \left(1 + \frac{(\varepsilon\beta)^2 C^2}{2}\right) \cos\delta}}. \quad (36)$$

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУТОГО СТЕРЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**

Поскольку постоянная закрепления (31) выражается через неизвестные координаты  $(\tilde{x}_A, \tilde{y}_A)$  точки приложения осевой силы, параметр  $q$  пока неизвестен и в общем случае подлежит определению из граничных условий.

Для стержня конечной длины интеграл (35) может быть вычислен и представлен через эллиптические интегралы, после чего возможен предельный переход к случаю полубесконечного стержня. Но поскольку в рассматриваемой задаче именно этот случай и представляет интерес, решение можно получить непосредственно из (35). Для этого заметим, что длина дуги стержня должна стремиться к бесконечности при  $\theta \rightarrow \delta$  и, следовательно, подинтегральная функция должна иметь неинтегрируемую особенность при верхнем пределе. Такая особенность будет обеспечена, если положить

$$q = 1. \quad (37)$$

Следовательно

$$\tilde{s}(\theta) = \frac{\sqrt{\cos \delta}}{(\varepsilon\beta)} \int_{-\delta/2}^{(\theta-\delta)/2} \frac{d\psi}{(\pm)\sin \psi}. \quad (38)$$

Для того чтобы длина дуги принимала положительные значения, необходимо удержать знак «-» в подинтегральном выражении, после чего этот интеграл может быть вычислен в замкнутом виде

$$\tilde{s}(\theta) = \frac{\sqrt{\cos \delta}}{(\varepsilon\beta)} \ln \left( \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \right) \Big|_{-\delta/2}^{(\theta-\delta)/2} = \frac{\sqrt{\cos \delta}}{(\varepsilon\beta)} \ln \frac{\left( 1 + \cos \left( \frac{\delta - \theta}{2} \right) \right) \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{\left( 1 + \cos \left( \frac{\delta}{2} \right) \right) \cdot \sin \left( \frac{\delta - \theta}{2} \right)}. \quad (39)$$

Аналогичные выражения для координат нейтральной оси можно получить, используя дифференциальные соотношения между длиной дуги  $s$  и координатами  $x$  и  $y$

$$dx = \cos \theta \cdot ds; \quad dy = \sin \theta \cdot ds. \quad (40)$$

Окончательно, аналитическое решение для деформированного состояния полубесконечного стержня, записанное во внутренних переменных имеет вид

$$\varepsilon \cdot \tilde{s}(\theta) = \sqrt{\frac{EI}{T}} \cdot g(\theta), \quad (41)$$

$$\varepsilon \cdot \tilde{x}(\theta) = \sqrt{\frac{EI}{T}} \left\{ \cos \delta \cdot g(\theta) - 2 \left[ \cos \left( \frac{\delta + \theta}{2} \right) - \cos \frac{\delta}{2} \right] \right\}. \quad (42)$$

$$\varepsilon \cdot \tilde{y}(\theta) = \sqrt{\frac{EI}{T}} \left\{ \sin \delta \cdot g(\theta) - 2 \left[ \sin \left( \frac{\delta + \theta}{2} \right) - \sin \frac{\delta}{2} \right] \right\}, \quad (43)$$

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУТОГО СТРЕЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**

---

где через  $g(\theta)$  обозначена функция

$$g(\theta) = \ln \frac{\left(1 + \cos\left(\frac{\delta - \theta}{2}\right)\right) \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{\left(1 + \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{\delta - \theta}{2}\right)}. \quad (44)$$

Уравнения (36), (37) позволяют однозначно определить постоянную закрепления  $C$

$$C = -\frac{2}{(\varepsilon\beta)} \frac{\sin(\delta/2)}{\sqrt{\cos \delta}} = -\frac{2}{\varepsilon} \sqrt{\frac{EI}{T}} \frac{\sin(\delta/2)}{\cos \delta}. \quad (45)$$

Для сращивания внутреннего решения (42), (43) с внешним решением (26) необходимо получить асимптотическое разложение внутреннего решения вдали от верхней опоры. Это можно сделать, рассмотрев предельное поведение функции (44) при  $\theta \rightarrow \delta$  в виде

$$g(\theta \rightarrow \delta) \approx \ln \frac{\left(4 \sin \frac{\delta}{2}\right)}{\left(1 + \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)\right)} - \ln(\delta - \theta). \quad (46)$$

Подставляя (46) в (42), (43), можно легко найти асимптотические выражения для координат и показать, что при  $\theta \rightarrow \delta$  они связаны соотношением

$$\tilde{y}(\theta \rightarrow \delta) \approx \tilde{x}(\theta \rightarrow \delta) \cdot \operatorname{tg} \delta + C, \quad (47)$$

причем постоянная  $C$  определяется формулой (45). Таким образом, как и следовало ожидать, вдали от опоры упругая линия стержня стремится к прямой линии, которая может быть сопоставлена с внешним решением. Переходя в (47) к внешним переменным в соответствии с (27), получаем

$$y_2(x) \approx x \cdot \operatorname{tg} \delta + \varepsilon \cdot C + a. \quad (48)$$

Обратимся к рассмотрению изгиба стержня во внутренней зоне «3» вблизи нижней опоры. Если ввести систему растянутых координат связанных с нижней опорой

$$\tilde{x} = (h - x) / \varepsilon ; \quad \tilde{y} = -y / \varepsilon, \quad (49)$$

то очевидно, что внутренне решение, записанное в этих координатах, будет идентично уже найденному решению (41)-(43). Поэтому асимптоти-

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**

---

ческий вид внутреннего решения на большом удалении от нижней опоры, записанный во внешних переменных, будет иметь вид

$$y_3(x) \approx x \cdot \operatorname{tg} \delta - h \cdot \operatorname{tg} \delta - \varepsilon \cdot C. \quad (50)$$

Сращивание асимптотических разложений внутренних решений (48) и (50) с внешним решением (26) приводит, соответственно, к двум простым уравнениям

$$C_0 = \varepsilon \cdot C + a \quad (51)$$

$$C_0 = -h \cdot \operatorname{tg} \delta - \varepsilon \cdot C. \quad (52)$$

С учетом выражения (45) следует, что угол  $\delta$  наклона упругой линии стержня является решением следующего трансцендентного уравнения

$$\operatorname{tg} \delta = -\frac{a}{h} - \frac{2C}{h} = -\frac{a}{h} + \frac{4 \sin(\delta/2)}{\beta h \sqrt{\cos \delta}}. \quad (53)$$

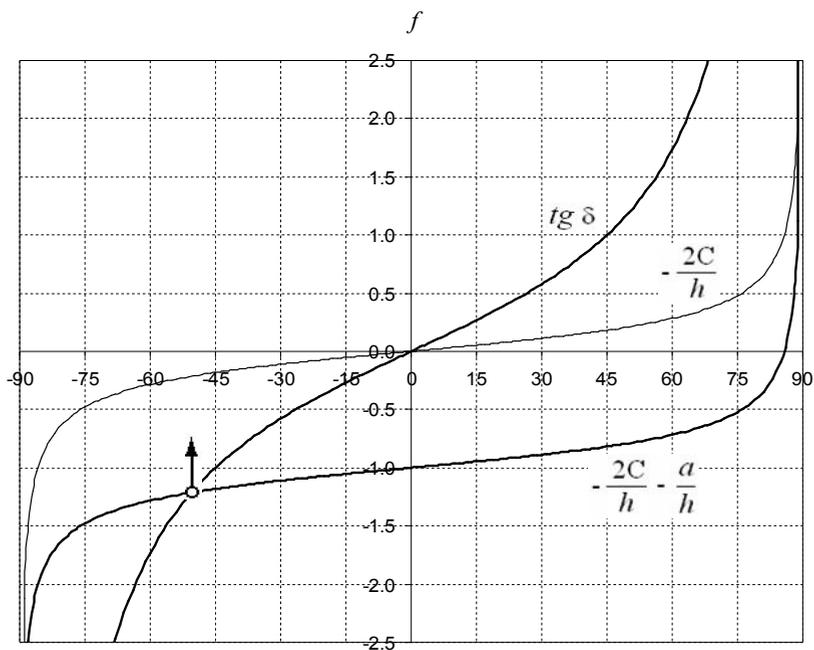
Первый член в правой части этого уравнения соответствует модели абсолютно гибкой нити, а второй член описывает влияние отличной от нуля изгибной жесткости стержня на угол наклона его упругой линии. Графическая интерпретация уравнения (53) для случая  $a/h = 1,0$  показана на рис. 7, из которого видно что, как и следовало ожидать, влияние изгибной жесткости всегда приводит к увеличению абсолютной величины угла  $\delta$ . Например, в случае  $\beta h = 10$  показанном на рис. 7 угол наклона упругой оси  $\delta \approx 50^\circ$  превышает результат, даваемый моделью абсолютно гибкой нити примерно на 5 градусов. Разница будет тем большей, чем больше изгибная жесткость стержня.

После того как угол наклона упругой оси  $\delta$  найден из уравнения (53), осевая сила  $T$  определяется выражением (28), и все элементы изгиба стержня могут быть немедленно вычислены. Вдали от опор упругая линия задается прямой линией (25), причем постоянная  $C_0$  определяется формулой (51) или (52) с учетом выражения (45) для постоянного закрепления. Форма стержня вблизи опор определяется уравнениями (41)-(43), которые могут быть переписаны во внешних переменных, используя соотношения (27) и (49) вблизи верхней и нижней опор, соответственно.

Для изгибающего момента вблизи опор стержня можно записать

$$M(\theta) = T \cdot (y(\theta) \cos \delta - x(\theta) \sin \delta). \quad (54)$$

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУТОГО СТЕРЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**



*Рис. 7. Решение трансцендентного уравнения  
для угла наклона упругой линии:  $a/h = 1,0$  ;  $\beta h = 10$*

После подстановки выражений для координат (42), (43) и преобразований формула для изгибающего момента приводится к простому виду

$$M(\theta) = 2\sqrt{\frac{P \cdot EI}{\cos \delta}} \sin\left(\frac{\delta - \theta}{2}\right). \quad (55)$$

Поэтому максимальные изгибающие моменты на опорах равны

$$M(0) = -P \cdot C = 2\sqrt{\frac{P \cdot EI}{\cos \delta}} \sin(\delta/2). \quad (56)$$

Аналогично можно найти выражение для перерезывающей силы в любом сечении стержня

$$N(\theta) = -P \frac{\sin(\delta - \theta)}{\cos \delta}. \quad (57)$$

Нетрудно показать, что асимптотическое решение нелинейной задачи переходит в соответствующее линейное решение при малых значе-

**АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУГОГО СТРЕЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР**

---

ниях угла наклона упругой оси. Действительно, при малых  $\delta$  значения тригонометрических функций, входящих в уравнение (53), могут быть заменены соответствующими значениями аргумента и это уравнение приводится к линеаризованному виду

$$\delta = -\frac{a}{h} + \frac{2\delta}{\beta h}, \quad (58)$$

откуда находим приближенное решение для угла

$$\delta = -\frac{a\beta}{\beta h - 2} = -\frac{a\beta}{\nu - 2}. \quad (59)$$

В этом случае формула (51) для постоянной  $C_0$  приводится к виду

$$C_0 = a \frac{\nu - 1}{\nu - 2}. \quad (60)$$

Эти формулы идентичны ранее найденным результатам (20), (21) для асимптотического решения линейной задачи.

**Заключительные замечания.** При рассмотрении как линейной, так и нелинейной задач внешнее решение для упругой линии стержня в форме прямой линии, а также постановка задач во внутренней зоне вблизи опор были угаданы интуитивно. Такой подход может быть оправдан относительной простотой данной задачи, которая обусловлена отсутствием поперечной нагрузки в пролете стержня. В общем случае эти положения могут быть строго обоснованы путем анализа нелинейного уравнения изгиба стержня.

В заключение заметим, что по соображениям симметрии полученные выше линейное и нелинейное асимптотические решения непосредственно распространяются на случай сложного изгиба жестко защемленного стержня сосредоточенной силой, приложенной в середине пролета.

Автор выражает благодарность компании ICON Engineering Pty Ltd (Australia), которая предложила автору эту задачу, обеспечив мотивацию и первоначальную финансовую поддержку работы. Автор также благодарен своему работодателю INTECSEA Pty Ltd за оказанное содействие.

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ  
ГИБКОГО УПРУТОГО СТРЕЖНЯ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОПОР

---

---

ЛИТЕРАТУРА

1. Найфе А.Х. Методы возмущений. – М.: Мир, 1976.
2. Папкович П.Ф. Строительная механика корабля. Ч. II. – Л.: Государственное издательство судостроительной промышленности, 1941.
3. Справочник по строительной механике корабля. Т. 1. – Л.: Судостроение, 1982.
4. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955.
5. Frisch-Fay R. Flexible Bars. – London: Butterworths, 1962.

Надійшла 12.04.2011

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, головн. наук. співпрацівник Морського інженерного бюро, наук. консультант **В.В. Козляков.**

**КОНЦЕПЦИЯ  
ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК МОРЕХОДНОСТИ СУДНА**

---

---

*Проанализированы современные требования к перспективному программному обеспечению для расчетов мореходности судна, требования к его функциональности. Рассмотрены возможности поэтапной верификации такого программного обеспечения.*

*Проведено аналіз сучасних вимог до перспективного програмного забезпечення для розрахунків морехідності суден, у т.ч. вимог до його функціональності. Розглянуто можливості поетапної верифікації такого програмного забезпечення.*

*Modern requirements to the perspective software for calculations of seaworthiness of a vessel, the requirement to its functionality are analyzed. Possibilities of stage-by-stage verification of such software are considered.*

**Ключевые слова:** *перспективное программное обеспечение, характеристики мореходности, качка судна, гидродинамические характеристики качки.*

В настоящее время трудно представить инженерную, научную деятельность без использования специализированного программного обеспечения (ПО), реализующего новые, либо широко известные расчетные алгоритмы. Такое ПО, используемое в расчетах мореходности, существенно повышает производительность труда инженера, проектанта, исследователя, дает ему мощный, основанный на результатах гидродинамической теории, инструмент для оценки поведения судна на волнении.

**Постановка проблемы.** Стратегически ПО для решения задач мореходности занимает узкую специализированную вертикальную нишу, в отличие от ориентированных на широкое использование разного рода электронных таблиц, систем обработки статистической информации и т.п. Его создание связано с трудностями не только теоретического, но и практического характера: величина трудозатрат на разработку и тестирование значительна. Велика также и совокупная стоимость такого ПО. В отечественной практике в подавляющем большинстве случаев его разработка ведется инженерами-корабелами, и основные усилия направлены на получение практических результатов при минимальных затратах. При этом вопросы унификации, архитектуры и расширяемости, как правило, уходят на второй план. Кроме того, существует разрыв между наличием значительного числа теоретических разработок (наработки кафедры «Теории и проектирования корабля» ОНМУ за 10-15 лет), многие из которых являются уникальными, и отсутствием разработанного ПО. Ситуация усугубляется еще и тем, что большая часть теоретических задач динамики корабля, которые были решены и реализованы в виде программ, не доведены до возможности эффективного практического использования.

**КОНЦЕПЦИЯ  
ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК МОРЕХОДНОСТИ СУДНА**

---

---

**Цель работы.** Настоящая работа посвящена анализу современных требований к ПО для расчетов качки судна, как основной составляющей комплексного критерия мореходности; разработке принципиальной модульной структуры такого ПО; оценке возможностей для его тестирования и сопровождения на всех стадиях разработки и использования.

**Изложение основного материала.** Перспективное программное обеспечение для расчетов качки может быть использовано в различных областях:

- в работе проектных или исследовательских организаций;
- в судоходных компаниях как часть комплекса бортового программного обеспечения;
- в работе служб порта, обеспечивающих безопасность движения по подходным каналам и судоходным путям;
- в учебном процессе вузов.

Наличие широкого круга решаемых задач, вызывает необходимость использования системного подхода к проектированию и созданию такого ПО. Анализ областей использования и различие решаемых задач позволяет выявить требования, которым должно удовлетворять перспективное ПО:

- модульная структура;
- масштабируемость (наращивание возможностей ПО в зависимости от решаемой задачи);
- стандартизация вида и формы входных данных.

Наиболее полно эти требования могут быть удовлетворены при использовании языковых средств разработки, поддерживающих объектно-ориентированный подход к проектированию, и в процессе создания программного кода. Это обуславливает использование языков высокого уровня, таких как C++, C#, Java.

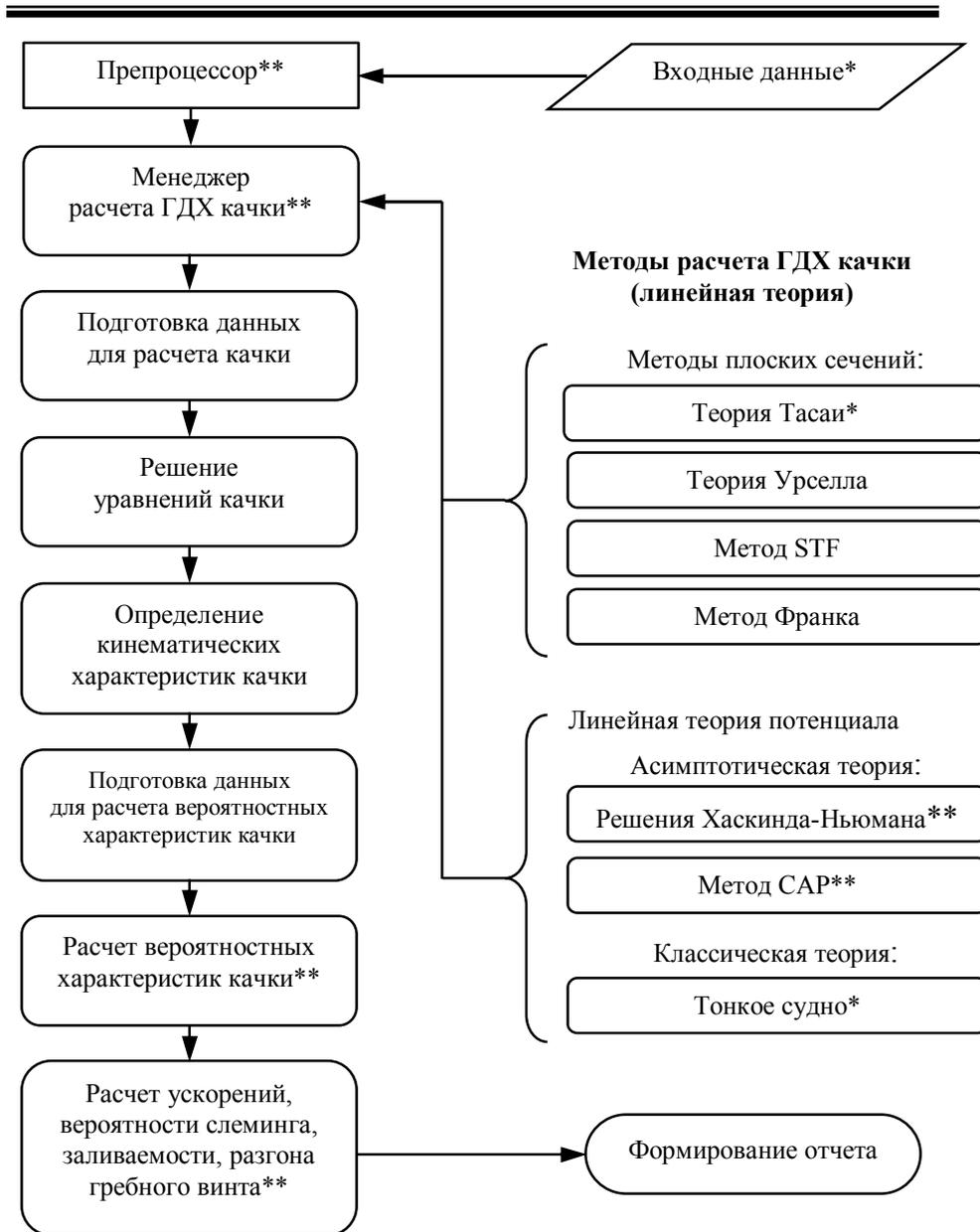
Анализ круга решаемых задач, позволил определить минимально необходимый набор модулей программы:

- модуль препроцессора;
- модуль расчета гидродинамических характеристик (ГДХ) качки судна;
- модуль расчета кинематических характеристик качки судна;
- модуль расчета вероятностных характеристик качки судна на нерегулярном волнении.

Кроме того, возможно дополнение или изменение числа модулей, в зависимости от того или иного варианта использования ПО.

На момент написания статьи созданы прототипы несколько важных модулей программы: модуль препроцессора, сформирован отладочный вариант формата описания геометрии корпуса судна, реализованы несколько методов расчета гидродинамических характеристик качки. Модульная структура программы представлена на рисунке 1.

**КОНЦЕПЦИЯ  
ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК МОРЕХОДНОСТИ СУДНА**



*Рис. 1. Модульная структура программы расчета качки*

*\* – модули, реализованные на момент написания статьи;*

*\*\* – модули, частично реализованные на момент написания статьи*

**КОНЦЕПЦИЯ  
ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК МОРЕХОДНОСТИ СУДНА**

---

---

В качестве средства разработки для создания прототипа использован язык программирования высокого уровня C++ “Standard for the C++ Language Programming” ISO/IEC 14882 1998. Наличие специальных языковых средств, стандартной библиотеки шаблонов STL, большое количество дополнительных расширений (библиотек) обусловили выбор данного инструментария. В соответствии с принципами ООП архитектура программы представлена в виде набора абстракций (классов), составляющих иерархию и взаимодействующих между собой по определенным сценариям. Один из ранних вариантов иерархии классов, созданных автором для решения задач качки приведен в [1].

В большинстве случаев представление судовой геометрии в программах расчета качки сводится к описанию поперечных сечений корпуса судна. Однако возможность импорта данных из других программ является востребованной на сегодняшний день. Наибольший интерес представляет импорт из программ трехмерного поверхностного и твердотельного моделирования, таких как Autocad, Free!Ship. Программный модуль, анализирующий входные данные и преобразующий их во внутренний файловый формат, будем далее именовать препроцессором. В его задачу входит также расчет гидростатических характеристик корпуса и анализ полноты и корректности введенных данных. Таким образом, препроцессор осуществляет всю предваряющую расчет подготовку исходных данных. Функциональная схема препроцессора приведена на рисунке 2.

Модуль менеджера расчета гидродинамических характеристик осуществляет выбор конкретного расчетного метода из всего числа доступных методов, в зависимости от внешних условий и геометрии корпуса судна. От его реализации зависит степень масштабируемости ПО.

Реализация методов расчета ГДХ качки – трудоемкий и поэтапный процесс, с которым связаны основные вычислительные трудности. Известно [2], что «любая работающая сложная система является результатом развития работавшей более простой системы». Поэтому, в первую очередь реализован относительно простой метод расчета ГДХ из семейства методов плоских сечений [3], что дает возможность тщательно отработать взаимодействие программных модулей.

Важную роль на всех стадиях разработки расчетных модулей играет процесс тестирования. В случае использования метода плоских сечений для верификации можно использовать экспериментальные данные, полученные Вогтсом [4], который получил демпфирование и присоединенные массы при колебаниях в жидкости цилиндров постоянного сечения и заданной формы. Также в работе [4] приведены исчерпывающие экспериментальные и расчетные данные для гидродинамических и кинематических характеристик качки судов различных обводов. В случае использования потенциальной теории для верификации расчетов гидро-

**КОНЦЕПЦИЯ  
ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК МОРЕХОДНОСТИ СУДНА**

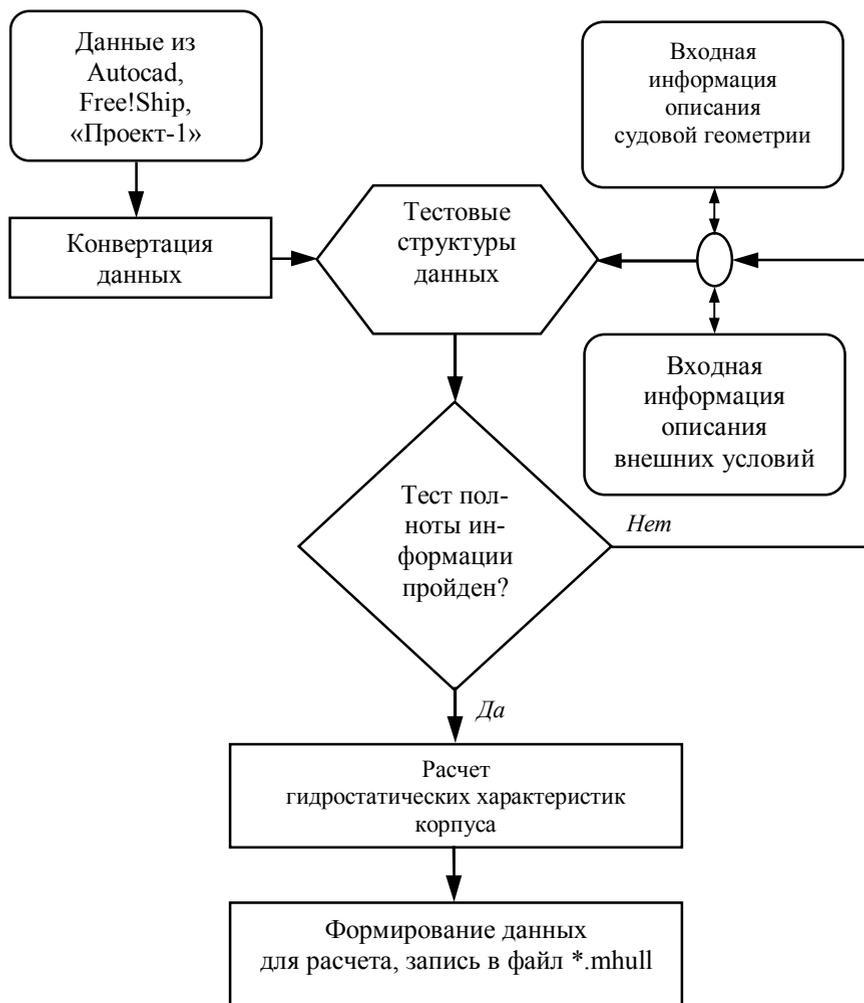


Рис. 2. Функциональная схема препроцессора

динамических давлений могут быть использованы данные, приведенные в работе [5], полученные для среднетоннажного танкера.

**Выводы.** В результате работы проанализированы требования к перспективному программному обеспечению для расчета характеристик качки судна. Разработана базовая версия модульной структуры такого ПО, установлена объектная структура отдельных модулей. Разработаны структуры данных для обмена информации между модулями. Проанализированы возможности верификации результатов расчетов от промежуточных до окончательных. Созданы работающие прототипы трех модулей, обеспечивающих основные функции перспективного ПО для расчетов качки.

**КОНЦЕПЦИЯ  
ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК МОРЕХОДНОСТИ СУДНА**

---

---

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Демидюк А.В. Использование объектно-ориентированного подхода для решения задач гидродинамики судна // Вісник ОДМУ. – Одеса: Вид-во ОДМУ. – 2001. – №7. – С. 39-42.
2. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++. – 2-е изд. / Пер. с англ. – М.: Издательство Бином», СПб.: «Невский Диалект», 1999. – 560 с.
3. Tasai F. On the Damping Force and Added Mass of Ships Heaving and Pitching// Journal Society of Naval Architects. – Japan. – 1959. – № 4. – P. 47-56.
4. Journée J.M.J. Verification and validation of Ship Motions Program SEAWAY / Report1213a Delft University of Technology. – 2001. – P. 102.
5. Демидюк А.В. Экспериментальное исследование распределения гидродинамических давлений на модели качающегося судна // Вісник ОНМУ. – Одеса: Вид-во ОНМУ. – 2003. – № 12. – С. 65-68.

Надійшла 30.01.2011

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Інформаційні технології» Одеського національного морського університету **В.Х. Кириллов**.

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

---

---

*Базируясь на методах вероятностного моделирования (метод распределения экстремума), сделана оценка прочности вертолетного шасси при посадке на палубу судна. Выполненный анализ является попыткой дать количественную оценку роли человеческого фактора в рассматриваемой ситуации.*

*Користуючись методами ймовірного моделювання (метод розподілення екстремуму), виконано оцінку міцності вертолітного шасі при посадці на палубу судна. Цей аналіз є спробою дати кількісну оцінку ролі людського фактору в ситуації, що розглядається.*

**Ключевые слова:** *вероятностное моделирование; метод распределения экстремума; посадка вертолета на палубу судна; прочность вертолетного шасси; человеческий фактор.*

**Introduction.** Human error contributes to about 80% of vehicular (marine, avionic and even automotive) casualties and accidents [1-4]. This large percentage should not be attributed, of course, to the direct human error only. A mishap often occurs because an erroneous decision is made by the vehicle operator in the conditions of uncertainty as a result of his/her interactions, in varying environmental conditions, with never-perfect forecasts, never 100% dependable navigation instrumentations and operation equipment, and not always user-friendly information. Considerable improvement in various safety-at-sea and safety-in-air situations can be expected through the better ergonomics, better work environment, better training and other aspects directly affecting human behavior in hazardous situations (see, for instance, [5-7]), as well as through improving the sensitivity, accuracy and robustness of the navigation devices and the operation equipment. There is also a significant opportunity (potential) for further reducing casualties and accidents at sea and in air through better understanding the role that various uncertainties play in the operator's world of work.

Uncertainties affecting the safe operation of a marine vehicle are associated with the human factor both directly (human fatigue, delayed reaction, erroneous decision-making, etc.) and indirectly, because of the imperfect forecast or because of the human interaction with various imperfect instrumentation and equipment. The major uncertainties include, but may not be limited to, the instrumentation and equipment performance, environmental conditions, accuracy and consistency of the processed information, predictability and timeliness of the response of the vehicle (object of control) to the harsh environmental conditions (rough seas, winds, currents, tides, gusts, atmospheric turbulence, etc.) and/or to the operator's actions, etc. Obviously, not all these uncertainties

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

---

---

have to be considered in each safety related situation, and not all the uncertainties have to be accounted for on the probabilistic basis, but it is also obvious that a careful insight into the possible and critical uncertainties has to be developed whenever appropriate.

By employing measurable ways to assess the role, the contributions and the interaction (“interfaces”) of the uncertain factors with the on-board hardware and software one could improve significantly the human performance. This performance should be viewed it as an important (perhaps the most important) part of the complex system “man-instrumentation-vehicle-environment”. Such a “systemic” approach, if properly developed and implemented, would enable one to predict and, if necessary, effectively minimize, with the highest cost-effectiveness possible, the probability of occurrence of a casualty or an accident. The analysis that follows contains an attempt to quantify, on the probabilistic basis [8], the role that the human factor plays, in terms of the reaction (decision making) time, in a helicopter-landing-ship (HLS) situation. The developed model can be used, with proper modifications, to analyze the vertical take-off and landing (VTOL) situation [9-17] as well.

NASA-Ames Center has conducted in the past [evaluations of the navigation performance of shipboard-VTOL-landing guidance systems](#) and several piloted simulation evaluations to assess the merits of a predictive lull swell guidance law for landing a VTOL aircraft at sea (see, for instance, [11-13]). Blackwell and Feik [14] developed and implemented on an ELXSI 6400 computer a mathematical model of the on-deck helicopter/ship dynamic interface. This work provides a capability for investigating helicopter/ship dynamic interactions, such as deck clearances on landing, swaying, toppling and sliding criteria, and tie-down loads. Different helicopter types can be readily examined and compared, given their undercarriage representation. Thomson, Coton Galbraith [15] carried out a simulator-based study of helicopter ship landing procedures incorporating measured flow data. Carrico and Ferrier [16] designed a Landing Period Designator (LPD) to provide ship motion cues to the pilot to assist him/her in anticipating ship deck quiescent periods that result in acceptable conditions for a shipboard landing. Sühr [8] applied the extreme-value-distribution (EVD) technique to evaluate the helicopter undercarriage strength when landing on a solid ground and on a ship deck. He showed also [18] how this technique could be applied to some other safety-at-sea situations, such as, for instance, establishing the adequate under-keel clearances (UKC) for a large crude-oil carrier entering harbor.

**Analysis. Probability that the Operation Time Exceeds a Certain Level.** The highest safety, in terms of the helicopter undercarriage strength, when landing on a ship deck, could be expected if such landing occurs during the lull period of the seas. Typically, officer-on-ship-board, using the information from the on-board surveillance systems, signals to the helicopter pilot, when the lull period (“wave window”) commences. The challenge is, of course,

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

---

to foresee, to an extent possible, the duration of the lull. If the (random) sum,  $T=t+\theta$ , of the (random) time,  $t$ , needed for the officer-on-ship-board and the helicopter pilot to make their go-ahead decisions on landing, and the (random) time,  $\theta$ , needed to actually land the helicopter on ship's deck, is lower, with a high enough probability, than the (random) duration,  $L$ , of the lull, then safe landing becomes possible.

In the analysis that follows we assume, just to illustrate our concept, the simplest probability distributions for the random times of interest. We use the Rayleigh's laws

$$f_t(t) = \frac{t}{t_0^2} \exp\left(-\frac{t^2}{2t_0^2}\right), \quad f_\theta(t) = \frac{\theta}{\theta_0^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\theta_0^2}\right), \quad (1)$$

as suitable approximations for the random times  $t$  and  $\theta$  of decision making and landing, and the normal law

$$f_l(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(l-l_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad \frac{l_0}{\sigma} \geq 4.0, \quad (2)$$

as an acceptable approximation for the random duration,  $L$ , of the lull. In the formulas (1) and (2),  $t_0$  and  $\theta_0$  are the most likely times of decision making and landing, respectively (in the case of a Rayleigh law these times coincide with the standard deviation of the random variables in question,  $l_0$  is the most likely (mean) value of the lull time, and  $\sigma$  is the standard deviation of the lull time. Note that the ratio  $\frac{l_0}{\sigma}$  ("safety factor") should be large enough (say, larger than 4), so that the normal law could be used as an acceptable approximation for a random variable that, in principle, cannot be negative, as this is the case when this variable is time.

The probability,  $P_*$ , that the sum  $T=t+\theta$  of the random variables  $t$  and  $\theta$  exceeds a certain time level,  $\hat{T}$ , can be found as

$$\begin{aligned} P_* = & 1 - \int_0^{\hat{T}} \frac{t}{t_0^2} \exp\left(-\frac{t^2}{2t_0^2}\right) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{(T-t)^2}{2\theta_0^2}\right) \right] dt = \exp\left(-\frac{\hat{T}^2}{2t_0^2}\right) + \\ & + \exp\left[-\frac{\hat{T}^2}{2(t_0^2 + \theta_0^2)}\right] \left\{ \frac{\theta_0^2}{t_0^2 + \theta_0^2} \left[ \exp\left[-\frac{t_0^2 \hat{T}^2}{2\theta_0^2(t_0^2 + \theta_0^2)}\right] - \exp\left[-\frac{\theta_0^2 \hat{T}^2}{2t_0^2(t_0^2 + \theta_0^2)}\right] \right\} + \\ & + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\hat{T} t_0 \theta_0}{(t_0^2 + \theta_0^2)^{3/2}} \exp\left[-\frac{\hat{T}^2}{2(t_0^2 + \theta_0^2)}\right] \left\{ \left[ \operatorname{erf}\left[\frac{t_0 \hat{T}}{\theta_0 \sqrt{2(t_0^2 + \theta_0^2)}}\right] \right] + \operatorname{erf}\left[\frac{\theta_0 \hat{T}}{t_0 \sqrt{2(t_0^2 + \theta_0^2)}}\right] \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

---



---

where

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz \quad (4)$$

is the error function (see, for instance, [8]). Clearly, when the time  $\hat{T}$  is zero, this time will be always exceeded ( $P_*=1$ ). When the time  $\hat{T}$  is infinitely long ( $\hat{T} \rightarrow \infty$ ), the probability that this time is exceeded is always zero ( $P_*=0$ ).

When the most likely duration of landing,  $\theta_0$ , is very small compared to the most likely time,  $t_0$ , required for making the two go-ahead decisions, the expression (3) yields

$$P_* = \exp\left(-\frac{\hat{T}^2}{2t_0^2}\right), \quad (5)$$

i.e., the probability that the total time of operation exceeds a certain time duration,  $\hat{T}$ , depends only on the most likely time,  $t_0$ , of decision making. From (5) we have

$$\frac{t_0}{\hat{T}} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln P_*}}. \quad (6)$$

If the acceptable probability,  $P_*$ , of exceeding the time,  $\hat{T}$  (e.g., the duration of the lull, if this duration is treated as a non-random variable of the level  $\hat{T}$ ), is, say,  $P = 10^{-4} = 0.01\%$ , then the time of making the go-ahead decisions should not exceed  $0.2330 = 23.3\%$  of the time,  $\hat{T}$  (expected duration of the lull), otherwise the requirement  $P \leq 10^{-4} = 0.01\%$  will be compromised. Similarly, when the most likely duration,  $t_0$ , of decision making is very small compared to the most likely time,  $\theta_0$ , of actual landing, the formula (3) yields

$$P_* = \exp\left(-\frac{\hat{T}^2}{2\theta_0^2}\right), \quad (7)$$

i.e., the probability of exceeding a certain time level,  $\hat{T}$ , depends only on the most likely time,  $\theta_0$ , of landing.

As follows from the formulas (1), the probability that the actual time of decision making or the time of landing exceeds the corresponding most likely time is expressed by the formulas of the types (5) and (7), and is as high as

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

---



---

$P_* = \frac{1}{\sqrt{e}} = 0.6065 = 60.6\%$ . In this connection we would like to mention that

the one-parametric Rayleigh law is characterized by a rather large standard deviation and therefore might not adequately reflect the probability density functions for the decision making time and the time of landing. A more “powerful” and flexible two-parametric law, such as, e.g., the Weibull law, might be more suitable and more practical as an appropriate probability distribution of the random times,  $t$  and  $\theta$ , but its use in the present analysis will make this analysis unnecessarily more complicated. We would like to emphasize that our intent is not to dot all the i’s and cross all the t’s as far as modeling of the role the human factor in the problem in question is concerned, but rather to demonstrate that the attempt to use well established methods of the theory of probability to quantify the role of the human factor in some safety-at-sea and similar problems is not at all hopeless. When developing practical guidelines and recommendations, a particular law of the probability distribution should be established based on the actual statistical data, and employment of various goodness-of-fit criteria (Pierson’s, Kolmogorov’s, etc.) might be needed in detailed statistical analyses.

When the most likely times  $t_0$  and  $\theta_0$  required for making the go-ahead decisions and for the actual landing, are equal, the formula (3) yields:

$$P_* = P_*\left(\frac{t_0}{\hat{T}}, \frac{\theta_0}{\hat{T}}\right) = \exp\left(-\frac{\hat{T}^2}{2t_0^2}\right) \left[ 1 + \sqrt{\pi} \frac{\hat{T}}{2t_0} \exp\left(\left(\frac{\hat{T}}{2t_0}\right)^2\right) \operatorname{erf}\left(\frac{\hat{T}}{2t_0}\right) \right]. \quad (8)$$

For large enough  $\frac{\hat{T}}{t_0}$  ratios  $\left(\frac{\hat{T}}{t_0} \geq 3\right)$  the second term in the brackets

becomes large compared to unity, so that only this term should be considered. The calculated probabilities of exceeding a certain time level,  $\hat{T}$ , based on the formula (8), are shown in Table 1 and plotted in Fig.1. In the third row of this table we indicate, for the sake of comparison, the probabilities,  $P^\circ$ , of exceeding the given time,  $\hat{T}$ , when only the time  $t_0$  or only the time  $\theta_0$  is different from zero, i.e., for the special case that is mostly far remote from the case  $t_0 = \theta_0$ . Clearly, the probabilities computed for all the other possible combinations of the times  $t_0$  and  $\theta_0$  could be found between the calculated probabilities  $P_*$  and  $P^\circ$ .

The following conclusions can be drawn from the Table 1 data:

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

---

1) the probability that the total time of operation (the time of decision making and the time of landing) exceeds the given time level  $\hat{T}$  rapidly increases with an increase in the time of operation;

2) the probability of exceeding the time level  $\hat{T}$  is considerably higher, when the most likely times of decision making and of landing are finite, and particularly are equal to each other, in comparison with the situation when one of these times is significantly shorter than the other, i.e., zero or next-to-zero. This is especially true for short operation times: the ratio  $P_*/P^\circ$  of the probability  $P_*$  of exceeding the time level  $\hat{T}$  in the case of  $t_0 = \theta_0$  to the probability  $P^\circ$  of exceeding this level in the case  $t_0 = 0$  or in the case  $\theta_0 = 0$  decreases rapidly with an increase in the time of operation. Thus, there exists a significant incentive in reducing the time of operation. The importance of this intuitively obvious fact is quantitatively assessed in our article.

Table 1. The probability  $P_*$  that the operation time exceeds a certain time level  $\hat{T}$  vs the ratio  $\hat{T}/t_0$  of this time level to the most likely time  $t_0$  of decision making for the case when the time  $t_0$  and the most likely time  $\theta_0$  time of actual landing are the same. For the sake of comparison, the probability  $P^\circ$  of exceeding the time level  $\hat{T}$ , when either the time  $t_0$  or the time  $\theta_0$  are zero, is also indicated.

$\hat{T}/t_0$	6	5	4	3	2
$P_*$	6.562E-4	8.553E-3	6.495E-2	1.914E-1	6.837E-1
$P^\circ$	1.523E-8	0.373E-5	0.335E-3	1.111E-2	1.353E-1
$P_*/P^\circ$	4.309E4	2.293E3	1.939E2	1.723E1	5.053

The data of the type shown in Table 1 can be used, particularly, to train the personnel for a quick reaction in a HLS situation. If, for instance, the expected duration of the lull is 30 sec, and the required (specified) probability of exceeding this time is  $P = 10^{-3}$ , then, as evident from the table data, the times for decision making and actual landing should not exceed 5.04 sec. It is advisable, of course, that these predictions are verified by simulation and by actual best practices. Another useful information that could be drawn from the data of the type shown in Table 1 is whether it is possible at all to train a human being to react, if necessary, in a split of a second. If not, then one should decide on a broader involvement of more sophisticated, more powerful and, perhaps, more expensive equipment to do the job. If such an effort is pursued, then probabilistic sensitivity analyses will be needed to determine the most promising ways to go.

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

---

**Probability that the Duration of the Operation of Landing Exceeds the Duration of the Lull.** The lull time  $L$  is a random normally distributed variable, and the probability that this time is found below a certain level  $\hat{L}$  is

$$P_l = P_l\left(\frac{\sigma}{\hat{L}}, \frac{l_0}{\hat{L}}\right) = \int_{-\infty}^{\hat{L}} f_l(l) dl = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\hat{L} - l_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right] = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{1 - \frac{l_0}{\hat{L}}}{\sqrt{2} \frac{\sigma}{\hat{L}}}\right) \right]. \quad (9)$$

The probability that the lull time in the HLS situation is exceeded can be determined by putting the times  $\hat{T} = \hat{L} = T$  and computing the product

$$P_A = P_*\left(\frac{t_0}{T}, \frac{\theta_0}{T}\right) P_l\left(\frac{\sigma}{T}, \frac{l_0}{T}\right) \quad (10)$$

of the probability,  $P_*\left(\frac{t_0}{T}, \frac{\theta_0}{T}\right)$ , that the time of operation exceeds a certain

level,  $T$ , and the probability,  $P_l\left(\frac{\sigma}{T}, \frac{l_0}{T}\right)$ , that the duration of the lull is shorter than the time  $T$ . The formula (10) considers the effect of the sea condition (through the values of the most likely duration,  $l_0$ , of the random lull time,  $L$ , and its standard deviation,  $\sigma$ ), the role of the human factor,  $t_0$  (the total most likely time required for the officer-on-ship-board and the helicopter pilot to make their go-ahead decisions for landing), and the most likely time,  $\theta_0$ , of actual landing (which characterizes both the qualification of the helicopter pilot and the qualities/behavior of the flying machine) on the probability of safe landing.

After a low enough allowable value,  $P_A^*$ , of the probability,  $P_A$ , is established (agreed upon), the equation (10) can be used to establish the allowable maximum most likely time,  $\theta_0$ , of landing. The actual time of landing can be assessed by the formula of the type (6)

$$\Delta t^* = \theta_0 \sqrt{-2 \ln P_l^*}, \quad (11)$$

where  $P_l^*$  is the allowable probability that the level  $\Delta t^*$  is exceeded. If, for instance,  $\theta_0 = 10$  sec and  $P_l^* = 0.00001$ , then  $\Delta t^* = 48.0$  sec.

**The Probability Distribution Function for the Extreme Vertical Velocity of the Ship's Deck.** The cumulative probability distribution function for the extreme vertical ship velocity  $\dot{z}^*$  (the probability that the vertical veloc-

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

---

ity of the ship deck at the location of interest is below a certain level  $\dot{z}^*$ ) due to her motions in waves can be expressed, using the extreme value distribution (EVD) technique, as follows [8]

$$F_{\dot{z}^*}(\dot{z}^*) = \exp \left[ -n^* \exp \left( -\frac{(\dot{z}^*)^2}{2D_{\dot{z}}} \right) \right] - \exp(-n^*). \quad (12)$$

Here  $D_{\dot{z}}$  is the variance the ship's vertical velocity  $\dot{z}$ ;  $n^* = \frac{\Delta t^*}{\tau_e}$  is the expected number of ship oscillations during the landing time  $\Delta t^*$ ; and  $\tau_e$  is the effective period of the ship motion in irregular seas. The formula for the  $n^*$  reflects an assumption that a ship in irregular waves behaves as a sort of a narrow-band filter that enhances the oscillations whose frequency is close to the ship's own natural frequency (in still water) in heave and pitch and suppresses all the other frequencies. Examine several special cases for the expression (12). If, in such a situation, the level  $\dot{z}^*$  is zero, the function formula (12) yields:  $F_{\dot{z}^*}(0) = 0$ . If the landing time (measured by the expected number  $n^*$  of ship oscillations) is significant, the second term in (12) becomes small, and this formula can be simplified

$$F_{\dot{z}^*}(\dot{z}^*) \approx \exp \left[ -n^* \exp \left( -\frac{(\dot{z}^*)^2}{2D_{\dot{z}}} \right) \right]. \quad (13)$$

If, in such a situation, the level  $\dot{z}^*$  is zero, the function  $F_{\dot{z}^*}(\dot{z}^*)$  becomes  $F_{\dot{z}^*}(0) = \exp(-n^*)$ , and, for a high enough  $n^*$  value, we still obtain  $F_{\dot{z}^*}(0) = 0$ . If, however, for a finite  $n^*$ , which is never zero and cannot be smaller than one, the level  $\dot{z}^*$  is high, the function  $F_{\dot{z}^*}(\dot{z}^*)$  becomes  $F_{\dot{z}^*}(\infty) = 1$ , as it is supposed to be.

**Allowable Landing Velocity when Landing on a Solid Ground.** The landing velocity,  $V$ , when landing on a solid ground, is a random variable that could be assumed to be normally distributed

$$f_v(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_v}} \exp \left[ -\frac{(v - \bar{v})^2}{2D_v} \right], \quad (14)$$

where  $\bar{v}$  is the mean value of the random velocity  $V$  and  $D_v$  is its variance. The probability distribution function of this velocity (i.e., the probability that the random velocity  $V$  is below a certain value  $v$ ) is

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

---

$$F_v(v) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{v - \bar{v}}{\sqrt{2D_v}} \right) \right]. \quad (15)$$

The allowable level  $v^*$  of the landing velocity  $V$ , assuming a large enough probability  $F_v(v^*)$ , can be found from the equation

$$F_v(v^*) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{v^* - \bar{v}}{\sqrt{2D_v}} \right) \right]. \quad (16)$$

**Allowable Landing Velocity when Landing on a Ship's Deck.** The cumulative distribution function for the relative vertical velocity

$$V_r = V + \dot{Z}^* \quad (17)$$

of the helicopter with respect to the ship's deck can be evaluated as

$$\begin{aligned} F(v) &= P(V_r \leq v) = \int_{-\infty}^{v_r} f_v(v) F_{\dot{z}^*}(v_r - v) dv = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi D_v}} \int_{-\infty}^{v_r} \exp \left[ -\frac{(v - \bar{v})^2}{2D_v} \right] \left[ \exp \left( -n^* \exp \left( -\frac{(\dot{z}^*)^2}{2D_z} \right) \right) - \exp(-n^*) \right] dv = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \exp \left[ -(\xi - \gamma)^2 \right] \left[ \exp(-n^* \exp(-\delta \xi^2)) - \exp(-n^*) \right] d\xi \end{aligned} \quad (18)$$

where  $\xi = \frac{v}{\sqrt{2D_v}}$  is the variable of integration

$$\gamma = \frac{v_r - \bar{v}}{\sqrt{2D_v}} = \gamma_t - \gamma_v \quad (19)$$

is the safety factor associated with the ship motion, which is computed as the difference between the total safety factor

$$\gamma_t = \frac{v_r}{\sqrt{2D_v}}, \quad (20)$$

when landing in rough seas on the ship's deck, and the safety factor

$$\gamma_v = \frac{\bar{v}}{\sqrt{2D_v}}, \quad (21)$$

when landing on the solid ground; and

$$\delta = \frac{D_r}{D_z} \quad (22)$$

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

---

is the ratio of the variance,  $D_r$ , of the relative velocity,  $V_r$ , of the helicopter undercarriage with respect to the ship's deck to the variance,  $D_z$ , of the ship's vertical velocity  $\dot{z}$ . The formula (18) determines the probability that the random relative velocity,  $V_r$ , of the helicopter undercarriage with respect to the ship's deck remains below a certain value,  $v_r$ . When  $D_z \rightarrow \infty$  (significant ship motions) and/or  $D_r \rightarrow 0$  (insignificant absolute vertical velocities of the helicopter), the ratio  $\delta = \frac{D_r}{D_z} \rightarrow 0$ . This situation is very unfavorable for the undercarriage strength: the probability that the extreme vertical velocity of the helicopter during its landing on the ship's deck remains below a certain  $v$  value is zero:  $F(v) = 0$ . For large enough (but not very large)  $n^*$  values (landing lasts for a rather long time), the formula (18) yields

$$F(v) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-(\xi - \gamma)^2 - n^* \exp(-\delta \xi^2)\right] d\xi. \quad (23)$$

For very large  $n^*$  values we have  $F(v) = 0$ : such a situation is certainly very unfavorable for safe landing. For not very large  $n^*$  values, however (landing does not take long), but large  $\delta = \frac{D_r}{D_z}$  ratios (significant variance of the relative velocity, but insignificant variance of the velocity of the vertical ship motions), the formula (23) can be further simplified

$$F(v) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-(\xi - \gamma)^2\right] d\xi = \frac{1}{2}(1 + \operatorname{erf}\gamma) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{v - \bar{v}}{\sqrt{2D_v}}\right) \right]. \quad (24)$$

This formula is not (and should not be) different from the formula (16) for the probability distribution function of safe landing on a solid ground. For small  $\delta = \frac{D_r}{D_z}$  ratios (but still large  $n^*$  values), the formula (23) yields

$$F(v) = \frac{1}{2} \exp(-n^*) \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{v - \bar{v}}{\sqrt{2D_v}}\right) \right]. \quad (25)$$

This formula contains a factor  $\exp(-n^*)$  that accounts for the finite duration of helicopter landing. When  $n^*$  is very small (very short time of landing), the situation is not different from the case of landing on a solid ground. When  $n^*$  is large, the situation is certainly unfavorable:  $F(v) = 0$ .

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

---

Thus, the probability that a certain level  $v_*$  of the relative velocity  $V_r$  of the helicopter with respect to the ship's deck is not exceeded can be found as  $P_B = F(v_*)$ . The probability  $F(v)$  can be determined either using the general formula (18), or one of the formulas (23), (24) or (25) for a particular special case.

**The Probability of Safe Landing.** The probability  $P_C$  that the undercarriage strength will not be compromised during helicopter landing (probability of safe landing) can be evaluated as a product of the probability  $1 - P_A$  that the helicopter will be able to land during the lull time and the probability  $P_B = F(v_*)$  that the relative velocity of the helicopter with respect to the ship's deck remains below a certain allowable (specified) level  $v^*$

$$P_C = (1 - P_A)P_B . \quad (26)$$

If the landing velocity,  $v_0$ , on the ground is treated as a deterministic value (if the variance  $D_v$  of this velocity can be considered zero) and the allowable relative velocity  $v^*$  (which is due to the undercarriage structure only) are known, then the condition of safe landing becomes quite simple. Indeed, in such a situation the equation (12) results in the following simple formula for the extreme value  $\dot{z}^*$  of the ship's vertical velocity

$$\dot{z}^* = \sqrt{2D_z \left[ \ln n^* - \ln(-\ln P_D + \exp(-n^*)) \right]}, \quad (27)$$

and the condition of safe landing becomes very simple

$$\dot{z}^* \leq v^* - v_0 . \quad (28)$$

**Numerical Examples. Example #1.** Let the most likely times of the go-ahead decision making and of the actual landing be the same and equal to  $t_0 = \theta_0 = 10$  sec, the most likely (mean) lull time be  $l_0 = 20$  sec, and the standard deviation of the lull time be  $\sigma = 5$  sec. Then, using the formulas (9) and (10) and the data in Table 1 we obtain: the data shown in Table 2. As evident from the Table 2 data, the probability  $P_A$  that the time of operations exceeds the duration of the lull increases rapidly with the decrease in the ratio of the lull duration to the most likely time of either the decision making or the landing process, while the probability that the lull duration is below a certain value decreases with the decrease in the ratio of this value to the most likely lull duration. The first effect prevails, and the product of these two probabilities (defining the likelihood that the helicopter is not successful in landing on the

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

ship's deck during the lull time) increases with the decrease in the duration of the lull time almost as fast as the probability of the operation time does. It is only for very long times of operation, that the probability  $P_l$  of exceeding a certain time limit starts to play an appreciable role, as far as the probability of safe landing is concerned. We conclude therefore that in the situation in question the human factor associated with the decision making times plays a significant role, as far as safe landing is concerned.

Table 2. The probability  $P_A$  of safe landing vs. the ratio  $\frac{T}{t_0}$  of the normally distributed duration  $T$  of the lull to the most likely time  $t_0$  of decision making or the most likely time  $\theta_0$  of actual landing, when the times  $t_0$  and  $\theta_0$  are equal

$T/t_0$	6	5	4	3	2
$P_*$	6,562E-4	8,553E-3	6,495E-2	1,914E-1	6,837E-1
$T/l_0$	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
$P_l$	1,0	1,0	0,9999	0,9770	0,5000
$P_A$	6,562E-4	8,553E-3	6,494E-2	1,870E-1	3,418E-1

**Example #2.** Let, for instance, the number of ship oscillations during the time of landing be  $n^* = 5$ , the required (specified) probability of safe landing be as high as  $P_D = 0.9999$ , the vertical velocity due to the ship motions during the lull period be  $D_z = 0.030m/sec$ , and the extreme value of the relative vertical velocity computed as the difference between the specified (allowable) velocity  $v^*$  of the helicopter and the actual ground landing velocity  $v_0$ , be  $v^* - v_0 = 0.8m/sec$ . Then the level of the relative velocity at the moment of landing is

$$\begin{aligned} \dot{z}^* &= \sqrt{2D_z \left[ \ln n^* - \ln \left( -\ln P_D + \exp(-n^*) \right) \right]} = \\ &= \sqrt{2 \times 0.030 \left[ \ln 5 - \ln \left( -\ln 0.9999 + \exp(-5) \right) \right]} = 0.629m/sec < 0.8m/sec. \end{aligned}$$

Hence, landing can be allowed and is expected to be safe.

**Conclusions.** The developed probabilistic model enables one to assess the role of the human factor, along with other uncertainty sources, in the helicopter-landing-ship (HLS) situation. Safe landing can be expected if the probability that it takes place during the lull time is sufficiently high. We developed simple and easy-to-use formulas enable one to evaluate this probability. The suggested model can be used in the analysis of the landing situation, as well as

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

---

---

in the probabilistic assessment of the strength of the helicopter undercarriage. It can be used also when developing guidelines for personnel training. Plenty of additional risk analyses and human psychology related effort will be needed, however, to make such guidelines practical.

**REFERENCES**

- [1] W.A. O'Neil, "The Human Element in Shipping", Keynote Address, Biennial symp. of the Seafarers International Research Center, Cardiff, Wales, June 29, 2001.
- [2] US Coast Guard. "Prevention Through People Quality Action Team Report", Washington, DC, USCG, 1995
- [3] P. Boisson, "Safety at Sea: Policies, Regulations and International Law", Bureau Veritas, Paris, 1999.
- [4] G. Miller, "Human Factor Engineering (HFE): What is it and how it can be used to reduce human errors in the offshore industry (OTC 10876)", Proceedings of 1999 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 3-6, 1999.
- [5] USCG Headquarters. Training System Standard Operating Procedures, Volume 2 Analysis. Washington. DC: USCG, 2008.
- [6] USCG Research and Development Center. USCG Guide for the Management of Crew Endurance and Risk Factors (Report No. CF-D-13-01). Groton. CN: USCG, 2001.
- [7] D.C. Foyle, B.L. Hooey, "Human Performance Modeling in Aviation", CRC Press, 2008.
- [8] E. Suhir, Applied Probability for Engineers and Scientists, McGraw-Hill, 1997.
- [9] US Patent #6064924, "Method and System for Predicting Ship Motion or the Like to Assist in Helicopter Landing", 1970.
- [10] US Patent #3516375, "Horizon Indicators for Assisting Helicopter Landing on Ships", 1970.
- [11] L.A. Mcgee, C.H. Paulk, Jr.; S. A Steck, S. F Schmidt, A. W. Merz, "Evaluation of the Navigation Performance of Shipboard-VTOL-Landing Guidance Systems", NASA-Ames Research Center, 1979.
- [12] Phatak, M.S. Karmali, C.H. Paulk, Jr., "Ship Motion Pattern Directed VTOL Letdown Guidance", NASA Ames Research Center, 1983.
- [13] C.H. Paulk, Jr.; A. V. Phatak, "Evaluation of a real-time predictive guidance law for landing VTOL aircraft at sea", NASA-Ames Research Center, 1984.
- [14] J. Blackwell, R.A. Feik, "A Mathematical Model of the On-Deck Helicopter/Ship Dynamic Interface", Aerodynamic Technical Memorandum, ADSB 130078, Sep. 1988.

**HELICOPTER LANDING SHIP (HLS):  
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE UNDERCARRIAGE STRENGTH  
AND THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR**

---

---

[15] D.G. Thomson, F.N. Coton, R.A.M. Galbraith, "Simulator Study of Helicopter Ship Landing Procedures Incorporating Measured Flow Data", *Proc. Inst. Mech. Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 219(5), 2005.

[16] "Swedish VISBY Class Corvette Sees First Helicopter Deck Landing: Ship-Helicopter Operation Limits (SHOL)", [http://www.navalhistory.dk/english/navynews/2006/1115\\_visbylynx.htm](http://www.navalhistory.dk/english/navynews/2006/1115_visbylynx.htm)

[17] D. Carico, B. Ferrier, "Evaluating Landing Aids to Support Helicopter/Ship Testing and Operations", *Aerospace Conference, 2006 IEEE*, vol.4, Issue 4-11, March 2006.

[18] E. Suhir, "Adequate Underkeel Clearance (UKC) for a Ship Passing a Shallow Waterway: Application of the Extreme Value Distribution (EVD)", *Rio-de-Janeiro, Brazil, OMAE2001/S&R-2113*, 2001.

*Надійшла 25.01.2011*

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, головн. наук. співпрацівник Морського інженерного бюро, наук. консультант **В.В. Козляков.**

## **ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОГО ПЕРЕГИБА КОРПУСА ТАНКЕРА СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ НА ОСТОЙЧИВОСТЬ И НЕПОТОПЛЯЕМОСТЬ**

---

*Выполнен анализ влияния остаточного перегиба корпусов танкеров типа «Волго-Нефть» на их плавучесть, остойчивость и непотопляемость. Показано, что наличие остаточного перегиба приводит к существенному изменению посадки. Остойчивость и непотопляемость судна при этом улучшаются.*

*Виконано аналіз впливу залишкового перегину корпусів танкерів типу «Волго-Нефть» на їх плавучість, остійність і непотоплюваність. Показано, що наявність залишкового перегину призводить до істотної зміни посадки. Остійність і непотоплюваність судна при цьому покращуються.*

*The analysis of the residual hull hogging influence on «Volgo-Neft» type tanker floatability, intact and damaged trim and stability is done. It is shown that the residual hull hogging leads to the significant change of trim. Intact and damaged trim and stability of the ship with residual hull hogging are better comparing with undeformed hull.*

**Ключевые слова:** *остаточный перегиб, танкер типа «Волго-Нефть», посадка, остойчивость, непотопляемость.*

**Постановка проблемы.** Благополучная, в целом, эксплуатация наиболее распространенных танкеров смешанного река-море плавания типа «Волго-Нефть» пр. 1577 (550А), характеризуется растущей остаточной деформацией перегиба. Столь большие остаточные деформации становятся опасными с позиций возникновения дополнительного прогибающего изгибающего момента на тихой воде, который может суммироваться с волновым изгибающим моментом и достигать 15 % его величины в полном грузу.

Владельцами флота танкеров рассматриваемого проекта проведены работы не только по исправлению остаточных деформаций, но и почти полной реновации грузовой части корпусов от 34 до 169 шп. К настоящему времени реновацию прошли 22 танкера. Ведущими исследовательскими и конструкторскими организациями России и Украины проведены обширные исследования этой проблемы. Результатами этих работ явились приближенная теория возникновения остаточного перегиба, а также различные технологии исправления остаточного перегиба.

Таким образом, основное внимание специалистов уделялось прочностным и технологическим аспектам проблемы. Вопросы мореходности судов с деформированными корпусами при этом оставались вне интереса исследователей.

## ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОГО ПЕРЕГИБА КОРПУСА ТАНКЕРА СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ НА ОСТОЙЧИВОСТЬ И НЕПОТОПЛЯЕМОСТЬ

**Целью статьи** является анализ влияния остаточного перегиба корпуса танкеров типа «Волго-Нефть» на посадку, остойчивость и непотопляемость. Влияние остаточного перегиба на поведение судна в условиях реального морского волнения предполагается представить в последующих публикациях.

**Изложение основного материала.** Ниже представлены результаты расчетов элементов плавучести танкера типа «Волго-Нефть» с недеформированным корпусом и корпусом с остаточным перегибом. Форма перегиба – квадратная парабола с максимальной стрелкой перегиба на миделе 300 мм. Все расчеты выполнялись с помощью лицензионного комплекса программ «Диалог-Статик», имеющего допуск Российского морского регистра судоходства и Регистра судоходства Украины. Осадка судна с остаточным перегибом измерялась от основной плоскости (ОП), проходящей через нижнюю кромку корпуса. Таким образом, возвышение нижней точки мидель-шпангоута составляло 300 мм над ОП.

Характеристики судна представлены далее в табл. 1.

*Таблица 1*

*Характеристики судна*

Длина наибольшая	132,60 м.
Длина между перпендикулярами	128,60 м.
Длина по ЛГВЛ	128,61 м.
Ширина габаритная	16,90 м.
Ширина расчетная	16,50 м.
Высота борта	5,50 м.
Осадка по грузовую марку	3,52 м.

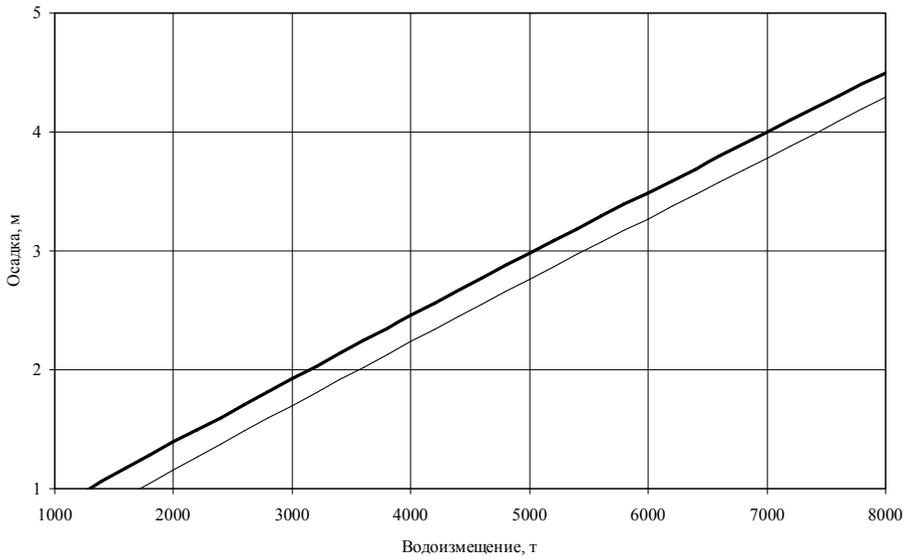
На рис. 1-4 представлены зависимости осадки, абсциссы центра величины, центра тяжести площади действующей ватерлинии и аппликаты метацентра от водоизмещения. Тонкая сплошная линия соответствует недеформированному корпусу, жирная – корпусу с перегибом. На рис. 5 представлена диаграмма осадок.

Анализ результатов, расчетов плавучести (см. рис. 1) свидетельствует о том, что при равном водоизмещении средняя осадка в морской воде со стандартной плотностью деформированного судна всегда будет больше, чем у судна с недеформированным корпусом.

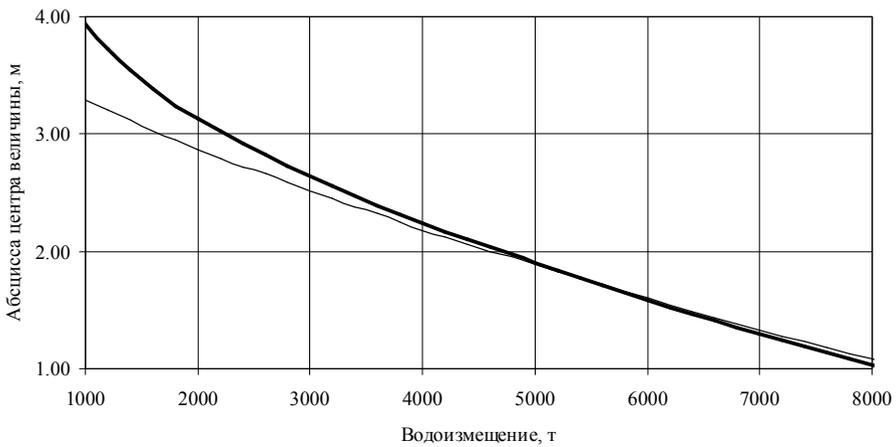
При одинаковом надводном борте, соответствующем положению диска Плимсоля, т.е. для ЛГВЛ в морской воде со стандартной плотностью водоизмещение деформированного судна будет на 165 т или на 2,55 % больше, чем у судна с недеформированным корпусом.

Таким образом, с точки зрения общей прочности, на деформированное судно будет действовать дополнительный прогибающий момент, обусловленный как остаточным перегибом корпуса, так и увеличением водоизмещения.

**ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОГО ПЕРЕГИБА КОРПУСА ТАНКЕРА  
СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ НА ОСТОЙЧИВОСТЬ И НЕПОТОПЛЯЕМОСТЬ**

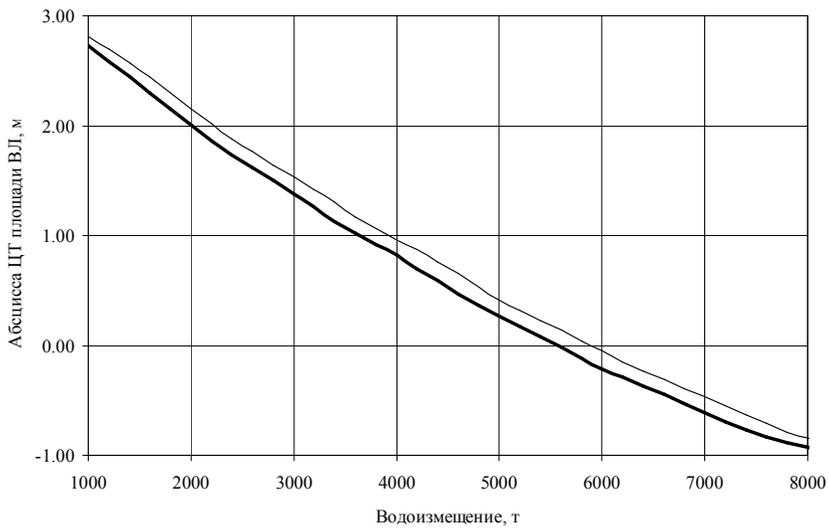


*Рис. 1. Зависимость водоизмещения от осадки для судна смешанного плавания без учета и с учетом общих деформаций корпуса*

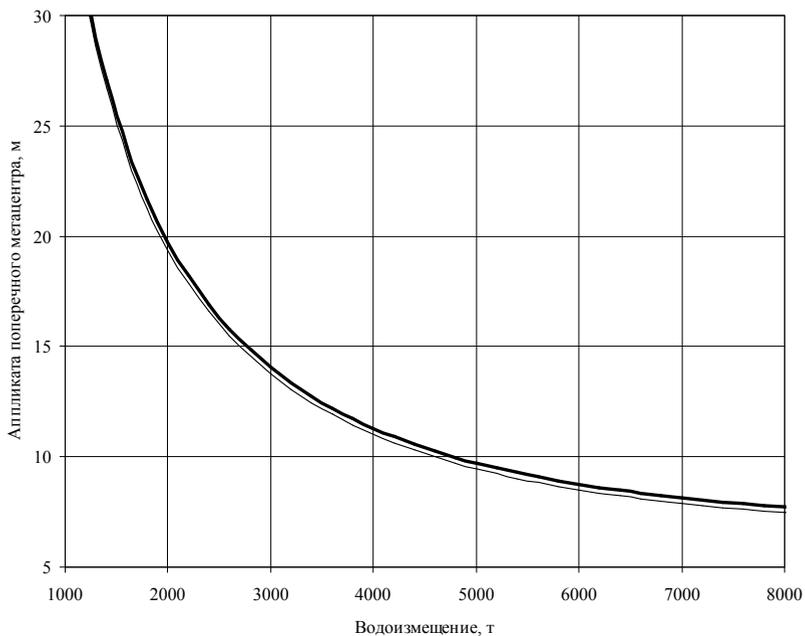


*Рис. 2. Зависимость абсциссы центра величины от водоизмещения для судна смешанного плавания без учета и с учетом общих деформаций корпуса*

**ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОГО ПЕРЕГИБА КОРПУСА ТАНКЕРА  
СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ НА ОСТОЙЧИВОСТЬ И НЕПОТОПЛЯЕМОСТЬ**



*Рис. 3. Зависимость абсциссы центра тяжести площади ватерлинии от водоизмещения для судна смешанного плавания без учета и с учетом общих деформаций корпуса*



*Рис. 4. Зависимость аппликаты поперечного метацентра от водоизмещения для судна смешанного плавания без учета и с учетом общих деформаций корпуса*

## ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОГО ПЕРЕГИБА КОРПУСА ТАНКЕРА СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ НА ОСТОЙЧИВОСТЬ И НЕПОТОПЛЯЕМОСТЬ

Для оценки влияния остаточного перегиба на остойчивость неповрежденного судна, а также на аварийную посадку и остойчивость, были выполнены расчеты допустимых возвышений центра тяжести неповрежденного и аварийного судна.

В последнем случае размеры пробоины соответствовали нормативным требованиям:

- начальная метацентрическая высота в конечной стадии затопления не менее 0,05 м;

- максимальное плечо диаграммы статической остойчивости не менее 0,10 м;

- протяженность положительной части диаграммы статической остойчивости не менее  $30^\circ$  при симметричном затоплении и  $20^\circ$  при несимметричном затоплении;

- угол крена до принятия мер по спрямлению при несимметричном затоплении не более  $25^\circ$ ;

- угол крена после принятия мер по спрямлению при несимметричном затоплении не более  $17^\circ$ ;

- площадь диаграммы статической остойчивости при перевозке наливных грузов не менее 0,0175 м<sup>2</sup>рад;

- отстояние опасных отверстий и аварийных источников электроэнергии от аварийной ватерлинии не менее 0,30 м.

Результаты расчетов представлены на рис. 6. Жирные линии соответствуют деформированному, тонкие – недеформированному корпусу. Сплошные линии соответствуют аварийной остойчивости, пунктирные – остойчивости неповрежденного судна.

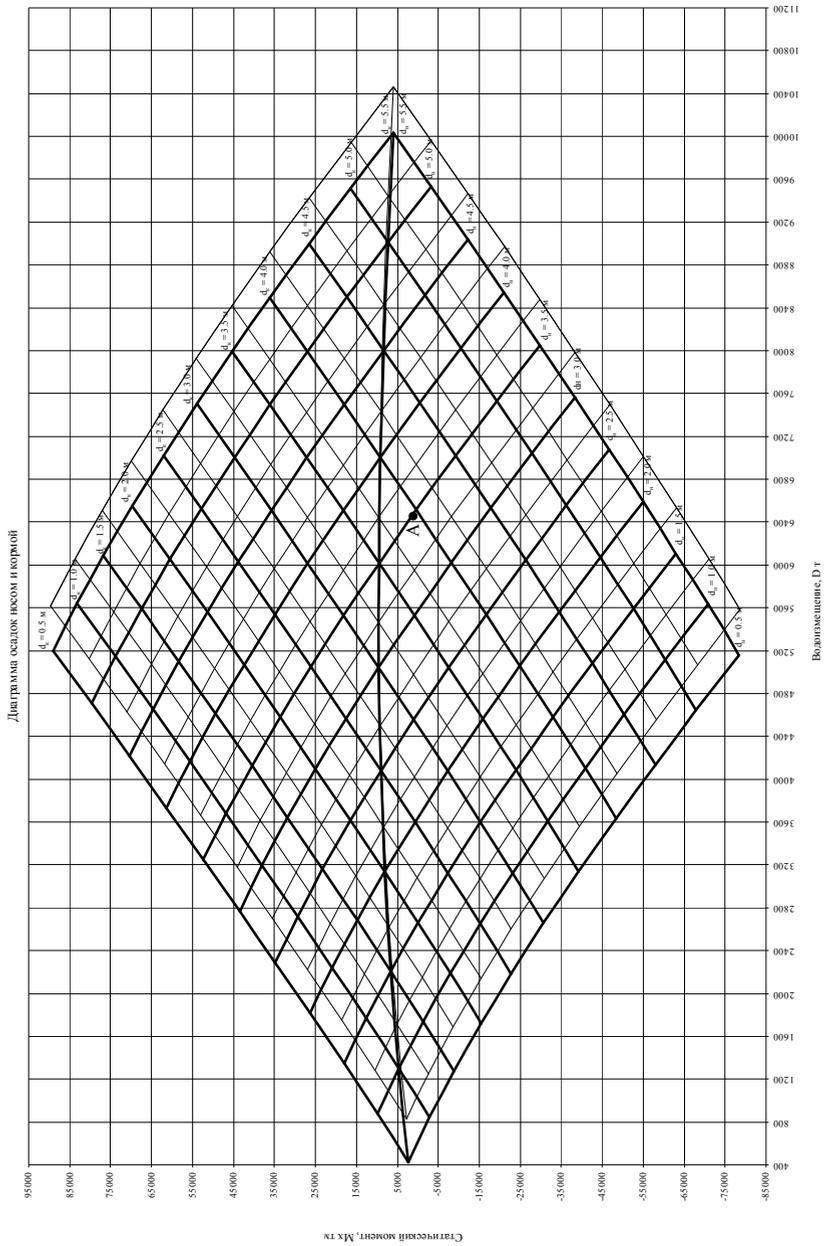
Наличие остаточного перегиба не меняет определяющие критерии остойчивости неповрежденного судна – угол максимума диаграммы статической остойчивости и критерии аварийной остойчивости – протяженность положительной части диаграммы статической остойчивости и ее площадь. Остаточный перегиб влияет только диапазон водоизмещений в котором действуют критерии.

Результаты расчетов показывают, наличие остаточного перегиба улучшает остойчивость как неповрежденного, так и аварийного судна.

**Выводы.** Наличие остаточного перегиба повышает и без того избыточную остойчивость и непотопляемость танкеров смешанного река-море плавания. Но при этом, при одинаковом надводном борте, соответствующем положению диска Плимсоля, т.е. для ЛГВЛ в морской воде со стандартной плотностью водоизмещение деформированного судна на 2.55% больше, чем у судна с недеформированным корпусом.

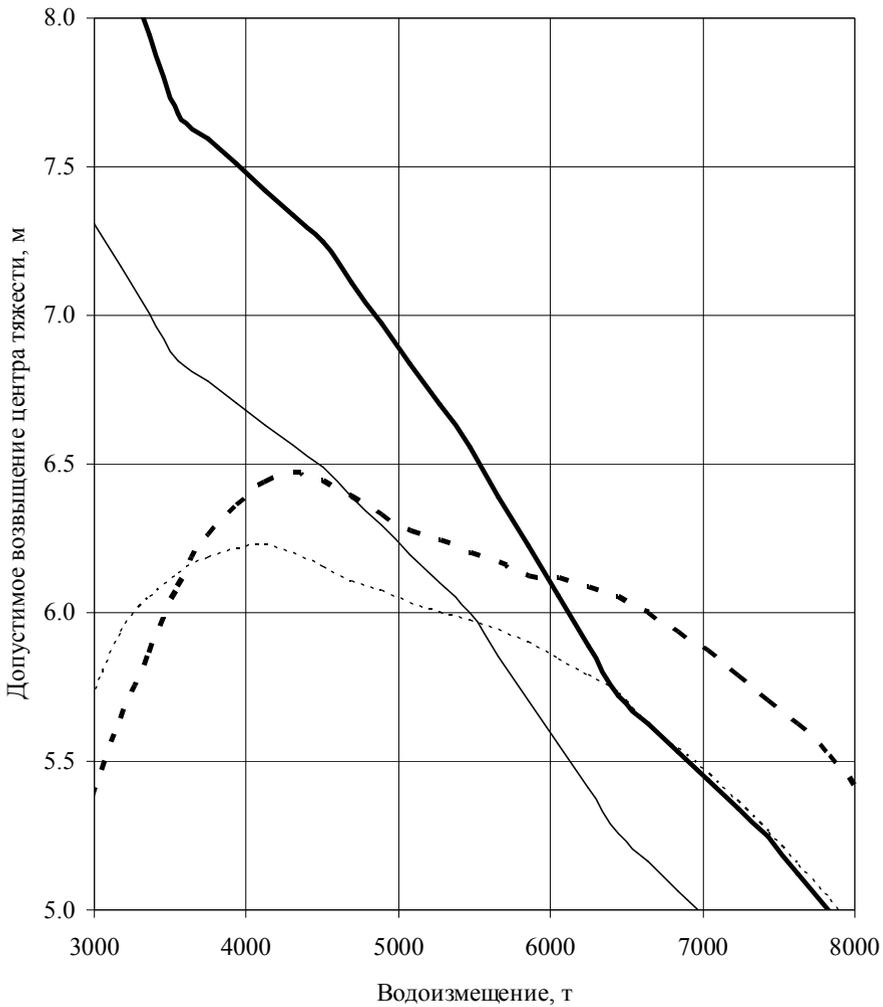
Общие деформации корпуса приводит к изменению сил поддержания и тем самым создают значительные сложности при определении массы принятого на борт или выгруженного груза. Кроме того, на деформированное судно действует дополнительный прогибающий момент, что увеличивает усилия на тихой воде в полном грузу.

**ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОГО ПЕРЕГИБА КОРПУСА ТАНКЕРА  
СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ НА ОСТОЙЧИВОСТЬ И НЕПОТОПЛЯЕМОСТЬ**



*Рис. 5. Диаграмма осадок носом и кормой для деформированного корпуса*

**ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОГО ПЕРЕГИБА КОРПУСА ТАНКЕРА  
СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ НА ОСТОЙЧИВОСТЬ И НЕПОТОПЛЯЕМОСТЬ**



*Рис. 6. Допустимые возвышения центра тяжести судна по критериям устойчивости и непотопляемости для недеформированного и деформированного корпусов*

*Надійшла 10.02.11*

**Рецензент** — доктор технічних наук, професор, генеральний директор Морського інженерного бюро **Г.В. Єгоров**.

**СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ БРУСА  
ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО МАТЕРИАЛА**

---

*Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой матриц жесткости и масс конечного элемента с 6 степенями свободы бруса, изготовленного из функционально-градиентного материала. Указанный конечный элемент может быть использован для решения широкого круга практических задач – изгиб поперечной нагрузкой бруса, сложный изгиб бруса, анализ устойчивости и колебаний бруса. Приведены результаты расчета консольного бруса.*

*Розглянуто питання, пов'язані з розробкою матриць жорсткості і мас скінченного елементу з 6 степенями свободи бруса, виготовленого з функціонально-градієнтного матеріалу. Вказаний скінченний елемент може бути використаний для вирішення широкого кола практичних завдань – згинання поперечним навантаженням бруса, складне згинання бруса, аналіз стійкості і коливань бруса. Наведено результати розрахунку консольного бруса.*

*The questions of development of a stiffness matrix and of a mass matrix of finite element with 6 degrees of freedom of the squared beam, made from functionally graded material, are considered. Mentioned finite element can be utilized for the solution of wide circle of practical tasks-bending transversal loading of squared beam, compound bending of squared beam, analysis of buckling and vibrations of the squared beam. The results of calculation of the cantilever squared beam are resulted.*

**Ключевые слова:** брус, функционально-градиентный материал (ФГМ), метод конечных элементов (МКЭ), конечный элемент (КЭ), матрица жесткости, матрица устойчивости, матрица масс.

**Постановка проблемы.** Функционально-градиентные материалы – это материалы, которые создаются из двух или более компонентов. При этом механические свойства каждого компонента изменяются в определенном направлении в соответствии с заданным законом. Такие материалы принято называть композитами. В настоящее время получены вещества для создания композитных материалов, обладающие высокой удельной жесткостью, прочностью, твердостью, жаростойкостью, не окисляемостью. При этом указанные вещества являются относительно недорогими. Композиты – это не только материалы, но и часть конструкции. Композит не изготавливается заранее. Как правило, он готовится вместе с деталью и, образуясь сам, образует деталь. Одной из важных механических характеристик композитного материала является модуль упругости, от которого существенно зависит жесткость изготавливаемой из него детали.

**СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ БРУСА  
ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО МАТЕРИАЛА**

Многокомпонентные материалы с заданным функциональным изменением механических свойств нашли широкое применение в космической технике, оптике, преобразователях энергии, электронных устройствах, химической промышленности, медицине.

Исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций, изготовленных из ФГМ, аналитическими методами наталкиваются на значительные затруднения. Многие задачи в этой области могут быть успешно решены численными методами. Применение МКЭ для анализа НДС конструкций из таких материалов является актуальным.

В работах [4, 5] приведены результаты анализа методом конечных элементов НДС прямоугольных пластин, модуль продольной упругости материала которых является функцией координат точек срединной плоскости.

**Цель работы.** В работе рассматриваются вопросы, связанные с применением МКЭ для решения статических и динамических задач бруса, модуль продольной упругости материала которого изменяется вдоль его оси (является функцией абсциссы сечения).

Рассмотрим КЭ бруса, в каждом естественном узле которого предусмотрено по три степени свободы: осевое перемещение  $u$ , нормальное перемещение  $v$  и угол поворота сечения

$\theta = \frac{dv}{dx} = v_{,x}$  (рис. 1). В этом случае вектор-столбец узловых перемещений КЭ имеет структуру

$$\{q(t)\}^T = \{u_1(t); v_1(t); v_{,x_1}(t); u_2(t); v_2(t); v_{,x_2}(t)\}. \quad (1)$$

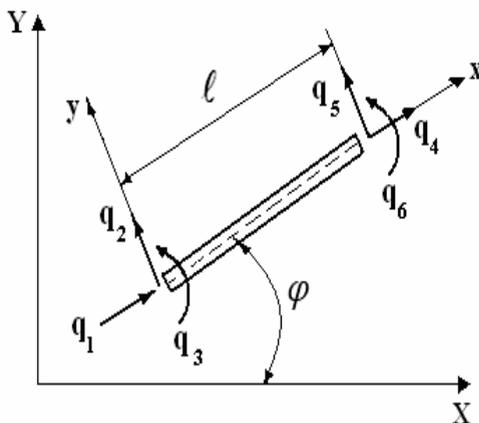


Рис. 1. Конечный элемент бруса, связанный с местной  $x, y$  и общей  $X, Y$  системами координат

$$(q_1 = u_1; q_2 = v_1; q_3 = v_{,x_1}; q_4 = u_2; q_5 = v_2; q_6 = v_{,x_2})$$

**СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ БРУСА  
ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО МАТЕРИАЛА**

---

Принятая структура вектора-столбца (1) позволяет представить функции осевых  $u(x)$  и нормальных  $v(x)$  перемещений точек оси КЭ в виде

$$u(x, t) = \beta_1(t) + \beta_2(t)x; \quad (2)$$

$$v(x, t) = \beta_3(t) + \beta_4(t)x + \beta_5(t)x^2 + \beta_6(t)x^3 \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) целесообразно записать в матричной форме

$$u(x, t) = [f_u(x)]\{\beta_u(t)\}; \quad v(x, t) = [f_v(x)]\{\beta_v(t)\}, \quad (4)$$

где  $[f_u(x)] = [1, x]$ ;  $[f_v(x)] = [1, x, x^2, x^3]$  – матрицы-строки координатных функций;

$\{\beta_u(t)\}^T = \{\beta_1(t), \beta_2(t)\}$ ;  $\{\beta_v(t)\}^T = \{\beta_3(t), \dots, \beta_6(t)\}$  – векторы-столбцы подлежащих определению множителей.

Выражения (4) целесообразно записать в более компактной форме

$$\begin{bmatrix} u(x, t) \\ v(x, t) \end{bmatrix} = [\psi(x)]\{\beta(t)\}, \quad (5)$$

где  $[\psi(x)] = \begin{bmatrix} [f_u(x)] & 0 \\ 0 & [f_v(x)] \end{bmatrix}$ ;  $2 \times 6$  (6)

$$\{\beta(t)\}^T = \{\beta_1(t), \dots, \beta_6(t)\}. \quad (7)$$

Применив выражение (5) для формирования кинематических условий в узлах КЭ, получим

$$\{q(t)\} = [B]\{\beta(t)\}, \quad (8)$$

где  $[B]$  – неособенная квадратная матрица преобразования.  $6 \times 6$

Из выражения (8) найдем

$$\{\beta(t)\} = [B]^{-1}\{q(t)\}. \quad (9)$$

**СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ БРУСА  
ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО МАТЕРИАЛА**

Нетрудно установить, что квадратная матрица  $[B]^{-1}$  имеет структуру

$$[B]^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{l} & 0 & 0 & \frac{1}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{l^2} & -\frac{2}{l} & 0 & \frac{3}{l^2} & -\frac{1}{l} \\ 0 & \frac{2}{l^3} & \frac{1}{l^2} & 0 & -\frac{2}{l^3} & \frac{1}{l^2} \end{pmatrix}.$$

Здесь  $l$  – длина КЭ.

Выражение (5) с учетом зависимости (9) преобразуется к виду

$$\begin{bmatrix} u(x,t) \\ v(x,t) \end{bmatrix} = [\psi(x)][B]^{-1}\{q(t)\}. \quad (10)$$

Помимо поперечной нагрузки брус может быть нагружен постоянными осевыми силами  $N$ .

Потенциальная энергия деформации КЭ постоянного поперечного сечения в местной системе координат  $X, Y$  (рис. 1) с учетом осевых сил  $N$  может быть вычислена по формуле

$$V_i = \frac{A}{2} \int_0^l E(x)(u')^2 dx + \frac{J}{2} \int_0^l E(x)(v'')^2 dx + \frac{N}{2} \int_0^l (v')^2 dx, \quad (11)$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения бруса;  $J$  – центральный момент инерции поперечного сечения бруса;  $E(x)$  – модуль продольной упругости материала бруса.

Примем, что в пределах длины КЭ модуль продольной упругости материала изменяется по линейному закону

$$E(x) = E_1 + \frac{E_2 - E_1}{l} x, \quad (12)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – значения модуля продольной упругости материала в сечениях левого ( $x = 0$ ) и правого ( $x = l$ ) узлов КЭ.

Выражение (11) с учетом зависимостей (10) и (12) преобразуется к виду

$$V_i = \frac{1}{2} \{q(t)\}^T ([k_e] + [k_g]) \{q(t)\}, \quad (13)$$

где

**СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ БРУСА  
ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО МАТЕРИАЛА**

$$[k_e] = [B]^{-T} \left( \int_0^l [\psi_e(x)]^T [D(x)] [\psi_e(x)] dx \right) [B]^{-1} \quad (14)$$

– матрица упругой жесткости КЭ в местной системе координат  $x, y$  (рис. 1);

$$[k_g] = [B]^{-T} \left( \int_0^l [\psi_g(x)]^T [S] [\psi_g(x)] dx \right) [B]^{-1} \quad (15)$$

– матрица геометрической жесткости (матрица устойчивости) КЭ в местной системе координат  $x, y$  (рис. 1).

В выражениях (14) и (15) обозначено:

$$[\psi_e(x)]_{2 \times 6} = \begin{bmatrix} \frac{d[f_u(x)]}{dx} & 0 \\ 0 & \frac{d^2[f_v(x)]}{dx^2} \end{bmatrix};$$

$$[\psi_g(x)]_{2 \times 6} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{d[f_v(x)]}{dx} \end{bmatrix};$$

$$[D(x)]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} A(E_1 + \frac{E_2 - E_1}{l} x) & 0 \\ 0 & J(E_1 + \frac{E_2 - E_1}{l} x) \end{bmatrix};$$

$$[S]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & N \end{bmatrix}.$$

Кинетическая энергия КЭ в местной системе координат  $x, y$  (рис. 1) может быть вычислена по формуле

$$T = \frac{A}{2} \int_0^l \rho(x) \left( \frac{du}{dt} \right)^2 dx + \frac{A}{2} \int_0^l \rho(x) \left( \frac{dv}{dt} \right)^2 dx, \quad (16)$$

где  $\rho(x)$  – плотность материала бруса.

Примем, что в пределах длины КЭ плотность материала изменяется по линейному закону

$$\rho(x) = \rho_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{l} x, \quad (17)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – значения плотности материала в сечениях левого ( $x = 0$ ) и правого ( $x = l$ ) узлов КЭ.

**СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ БРУСА  
ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО МАТЕРИАЛА**

Выражение (16) с учетом зависимостей (10) и (17) преобразуется к виду

$$T = \frac{1}{2} \left\{ \dot{q}(t) \right\}^T [m] \left\{ \dot{q}(t) \right\}, \quad (18)$$

где  $\left\{ \dot{q}(t) \right\} = \left\{ dq(t)/dt \right\}$ ;

$$[m] = [B]^{-T} \left( \int_0^l [\psi_m(x)]^T [\mu(x)] [\psi_m(x)] dx \right) [B]^{-1} \quad (19)$$

– матрица масс КЭ в системе осей  $X, Y$ .

В выражении (19) обозначено

$$[\psi_m(x)]_{2 \times 6} = \begin{bmatrix} [f_u(x)] & 0 \\ 0 & [f_v(x)] \end{bmatrix};$$

$$[\mu(x)]_{2 \times 2} = A \begin{bmatrix} \rho_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{l} x & 0 \\ 0 & \rho_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{l} x \end{bmatrix}.$$

Формулы для вычисления элементов матриц, заключенных в круглые скобки выражений (14), (15) и (19), получены в явном виде, однако, в силу их громоздкости и ограниченности объема статьи здесь не приводятся.

Если местная система координат КЭ не совпадает с системой координат конструкции (общей системой координат), то потребуется выполнить процедуру преобразования матриц жесткости  $[k_e], [k_g]$  и масс  $[m]$  КЭ к общей системе координат. Указанная процедура подробно рассмотрена в работе [3].

Разработанные матрицы  $[k_e], [k_g]$  и  $[m]$  включены в библиотеку матриц жесткости и масс пакета прикладных программ «Квант», предназначенного для анализа прочности, устойчивости и колебаний пластинчато-стержневых систем.

В работах [1, 2] подробно рассмотрена процедура вывода уравнения движения упругой системы. Применительно к рассматриваемой задаче указанное уравнение имеет вид

$$[M] \left\{ \ddot{Q}(t) \right\} + ([K_e] + [K_g]) \left\{ Q(t) \right\} = \left\{ P(t) \right\}, \quad (20)$$

где  $[K_e], [K_g], [M]$  – матрицы жесткости и масс бруса (ансамбля КЭ) в общей системе координат;

**СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ БРУСА  
ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО МАТЕРИАЛА**

---

$\{Q(t)\}$  – вектор узловых перемещений бруса в общей системе координат;

$\{\ddot{Q}(t)\}$  – вектор узловых ускорений;

$\{P(t)\}$  – вектор внешних узловых сил в общей системе координат.

Для формирования матриц  $[K_e]$ ,  $[K_g]$ ,  $[M]$  необходимо использовать уравнения (14), (15) и (19) для вычисления коэффициентов матриц жесткости и масс отдельного КЭ.

Из выражения (20) нетрудно получить уравнения для решения различных частных задач теории бруса, изготовленного из функционально-градиентного материала, каждая из которых заслуживает отдельного рассмотрения – изгиб поперечной нагрузкой, сложный изгиб, анализ устойчивости и колебаний.

Например, матричное уравнение для решения статических задач имеет вид

$$[K_e] \cdot \{Q\} = \{P\}. \quad (21)$$

Для иллюстрации полученных результатов рассмотрен изгиб консольного бруса, изготовленного из изотропного функционально-градиентного материала. Расчетная схема бруса приведена на рис. 2, а. Брус имеет следующие характеристики: длину  $L=2,0$  м; площадь поперечного сечения  $A = 28,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ; центральный момент инерции  $J = 1840 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$ ; модуль продольной упругости  $E$  материала изменяется вдоль оси бруса по линейному закону от значения 200 ГПа на правом конце ( $x = L$ ) и до значения 600 ГПа на левом конце ( $x = 0$ ). Отношение  $E_{\max}/E_{\min}$  выбрано из диапазона  $2 \leq E_{\max}/E_{\min} \leq 10$  по аналогии с данными работы [5]. В сечении  $x = L$  к брусу приложена сосредоточенная сила  $P = 50 \text{ кН}$ . В расчетах использована равномерная сетка (четыре КЭ, имеющих одинаковую длину  $l = 0,5 \text{ м}$ ).

На рис. 2, б приведены эпюры нормальных перемещений (прогибов) поперечных сечений рассматриваемого бруса для случаев с переменным (кривая 1) и постоянным (кривая 2) по длине модулем продольной упругости материала (для второго случая расчет выполнен при значении модуля продольной упругости  $E = 200$  ГПа).

Результаты, приведенные на рис. 2, свидетельствуют об увеличении жесткости бруса, связанной с рассмотренным законом изменения модуля продольной упругости материала.

**Вывод.** Разработаны матрицы жесткости и масс КЭ бруса, предназначенные для решения задач о прочности, устойчивости и колебаниях плоских стержневых конструкций из функционально-градиентного материала.

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ БРУСА  
 ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО МАТЕРИАЛА

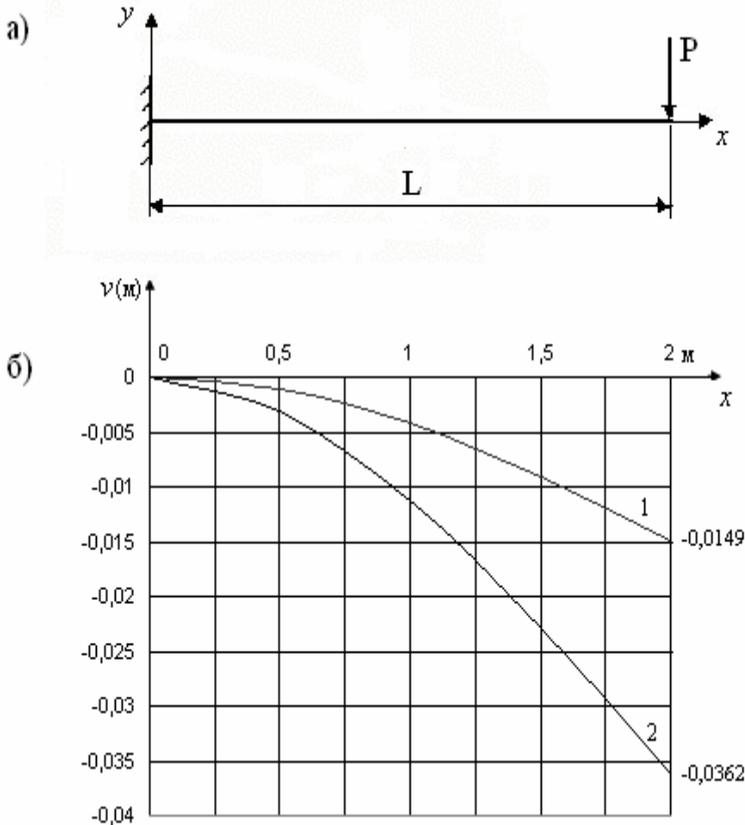


Рис. 2. Изгиб консольного бруса:

- 1 – функционально-градиентный материал;  
 2 – материал с неизменяемым модулем упругости

### ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Б.И. Применение высокоточного конечного элемента изгибаемой пластины для решения статических и динамических задач // Сб. научн. трудов Петровской академии наук и искусств / Под общ. ред. В.А. Коковина. – СПб.: ИК «Синтез», 2002. – Вып. 11. – С. 6-12.
2. Antonov B.I. The solution of static and dynamic flat tasks of the theory of elasticity by finite element method / Proceedings of first international on mechanical and electrical engineering and technology and fourth international conference on marine industry. – Varna, 2002. – Vol. II. – P.175-180.

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ БРУСА  
ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО МАТЕРИАЛА

---

3. Антонов Б.И. Решение статических и динамических задач для бруса переменного сечения методом конечных элементов // *Вісник ОНМУ*. – Одеса: ОНМУ, 2005. – Вип. 17. – С. 271-281.
4. Мартиняк Р.М., Дмитрів М.І. Скінченноелементне дослідження напружено-деформованого стану неоднорідної прямокутної пластині /*Математичні методи та фізико-механіч. поля*. – Львів: Видавн. Центр ін-та прикл. проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. – 2009. – № 1. – С. 107-114.
5. Anlas G., Santare M.H., Lambros J. Numerical calculation of stress intensity factors in functionally graded materials // *Int. J. Fract.* – 2000. – 104. P. 131-143.

Надійшла 20.03.2011

**Рецензент** – кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри «Теорія та проектування корабля» Одеського національного морського університету **С.М. Баскаков**.

---

---

**ЕЩЕ ОБ ИСТОРИИ ОДЕССКИХ ОПОЛЗНЕЙ**

---

---

*Приведены некоторые исторические сведения об Одесских склонах и оползнях.*

*Приведено деякі історичні відомості про Одеські схили і зсуви.*

*Some historical data on the Odessa slopes and landslips are resulted.*

**Ключевые слова:** *Одесские склоны, оползни, грунты, подземные воды, море, штольни, галереи.*

*Разбор идей и предложений по дифференциации причин, вызывающих оползни, позволяет сделать общий вывод, что в настоящее время возникновение оползней не может объясняться какой-либо одной универсальной причиной. Обычно такой сложный процесс как неоднократные смещения больших масс горных пород может возникнуть в результате одновременного или равномерного действия ряда причин. Вместе с тем, очевидно, что необходимы какие-то общие условия, которые благоприятствовали бы формированию оползней на склоне.*

**Дранников А.М. "Оползни, причины образования, меры борьбы"**

Данная работа является продолжением описания истории Одесских оползней, изложенного в статье [1], и охватывающего период с 1813 по 1920 г. В этой статье было показано, что за указанное время предпринимались отдельные субъективные попытки только качественно объяснить причины образования оползней, и выполнялись частные бессистемные работы по их ликвидации. Эти работы обычно начинались после очередного крупного оползня, а затем постепенно прекращались. Все это приводило к малоэффективным, а часто к совершенно бесполезным результатам. Главное состояло в том, что не были решены следующие основные проблемы: не установлены причины, вызывающие оползневые процессы на склонах морского побережья, и каким образом их ликвидировать и не допускать в дальнейшем.

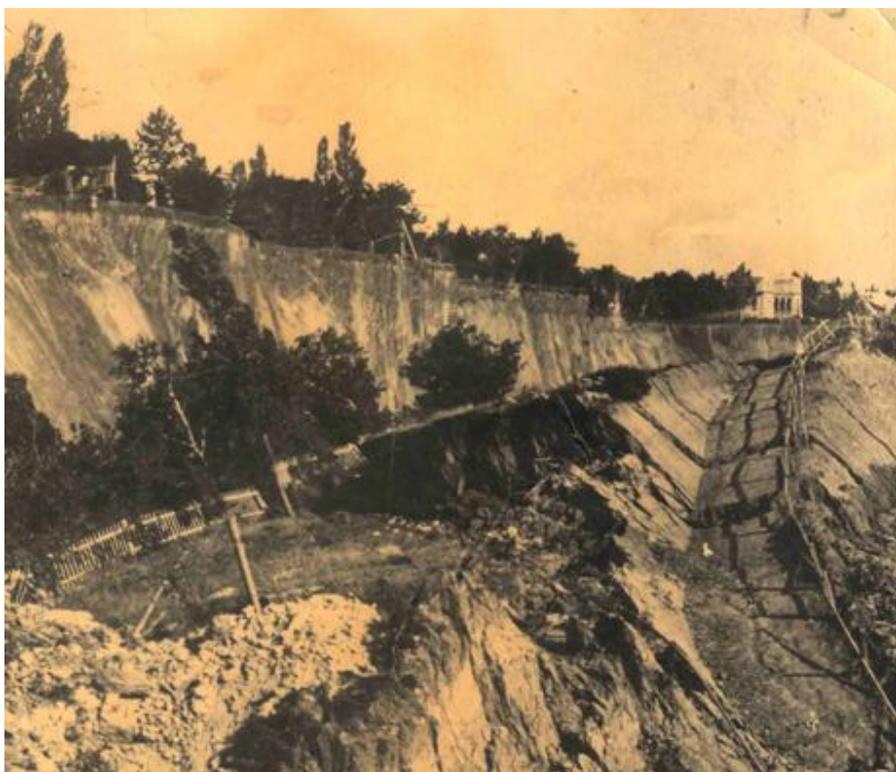
В предлагаемой статье будет продолжено исследование вопросов, связанных с историей Одесских оползней, начиная с 1920 и до 1950 г. Некоторые из них были затронуты в ранее опубликованной монографии [2]. Октябрьская Революция совершилась, но оползни, как показано на рисунках 1, 2, продолжались, нанося городу и его жителям моральный и

ЕЩЕ ОБ ИСТОРИИ ОДЕССКИХ ОПОЛЗНЕЙ

---



*Рис. 1. Оползень на Малом Фонтане*



*Рис. 2. Очередной более крупный оползень на морском побережье*

---

---

**ЕЩЕ ОБ ИСТОРИИ ОДЕССКИХ ОПОЛЗНЕЙ**

---

---

материальный урон. Для утешения можно только отметить, что ученые астрономы сфотографировали оползни, которые возникают даже на Марсе. Так почему же их не может быть также в Одессе? Приведем несколько примеров оползней, происшедших на Одесском побережье только с 1920 до 1940 г.

В 1925 г. на Малом Фонтане произошел сравнительно небольшой оползень. Массив грунта длиной 60 и шириной 12 м опустился на глубину 7 м. Но в 1936 г. на 11-й станции Большого Фонтана опустился на 8 м массив грунта, имеющий уже 125 м в длину и 58 м в ширину. Начало этого оползня наблюдалось в 1932 г. в виде закола, представляющего небольшую трещину. Затем шло медленное опускание массива. Так за первые два года он опустился на 0,8 м, а за вторые два года на 0,69 м. Но 14 августа 1936 г. в 6 часов 30 минут началось интенсивное вертикальное смещение массива, достигшее максимума в 12 часов, при скорости равной 1,0 м в час. В 17 часов 30 минут перемещения массива почти прекратились и наблюдались только небольшие микроподвижки. В процессе опускания массива происходило выжимание дна моря. По окончанию оползня оно представляло собой вал высотой до 3,5 метра и максимальной шириной 55 метров. На оползневой террасе образовались широкие трещины, а ее опускание колебалось от 5 до 5,4 метра. Образцы грунта из пробуренных скважин позволили установить, что опускание массива к 1934 г. происходило только по красно-бурым глинам без нарушения ниже лежащего слоя известняка. Результаты образцов грунта после окончания оползня показали, что весь массив вместе с меотической глиной переместился вниз.

Интересно отметить, что почти такая же картина начала образования сползания массива наблюдалась со следующими оползнями. В 1932 г. на стадионе профсоюза трамвайщиков образовалась в грунте трещина, ограничивающая участок массива длиной 150 и шириной 42 метра. Не сразу после образования закола, а только в декабре 1938 г. произошло опускание этого массива на 2,5 метра. Оползень на стадионе Динамо (Пролетарский бульвар) начался в 1934 г. в виде трещины закола, отделившей массив грунта длиной почти 240 и шириной 32 метра. К 1940 г. верхняя площадка этого массива постепенно опустилась на величину от 4 до 6,3 метра.

В связи с трудностями финансирования, фактически до 1938 г. серьезных генеральных мер по борьбе с оползнями в Одессе не было принято. Однако частные работы по изучению причин оползневых процессов выполнялись в различных ведомствах следующими энтузиастами, которые своими исследованиями способствовали более глубокому пониманию явлений, происходящих в склонах. Этим занимались М.Ф. Бесчастный (1923-1924), А.К. Алексеев (1925), Е.Е. Китран (1928), Е.А. Гапонов (1932), И.Я. Яцко (1935-1938). Также с 1928 г. по 1938 г. на склонах велась изыскательская работа Оползневой станцией.

---

---

**ЕЩЕ ОБ ИСТОРИИ ОДЕССКИХ ОПОЛЗНЕЙ**

---

---

Из наиболее существенных противооползневых сооружений, выполненных в это время, остановимся только на строительстве с 1924 по 1928 г. дренажной галереи, показанной на рисунке 3 и названной Лермонтовской. Ее возведение вызвано было необходимостью перехватить подземные воды второго горизонта и этим прекратить разрушение Черноморской улицы, дома на которой были расположены на расстоянии от 2 до 20 м от обрыва и подвержены трещинообразованию от интенсивных подвижек оснований. Галерея начиналась в начале Черноморской улицы и проходила вдоль ее, пересекая Лермонтовский курорт, до угла улиц Уютной и Морской. Общая протяженность дренирующей части галереи составила 1026 м. Главный ее вывод (южный) сбрасывал после окончания строительства 115,2 м<sup>3</sup>/час подземной воды, но только в море попадало 61 м<sup>3</sup>/час, остальные 54,2 м<sup>3</sup>/час уходили в оползшие у ее выхода грунты, вызывая их переувлажнение. Пробуренные скважины на Черноморской улице показали отсутствие воды в известняках, но лессовые грунты были переувлажены водой первого водоносного горизонта. В результате, Лермонтовская галерея прекратила развитие оползней I типа, но оползни III типа продолжались.



*Рис.3. Дренажная галерея*

В августе 1938 г. была образована в Одессе Областная противооползневая комиссия при Областном исполнительном комитете. Ее основной задачей считалась координация мероприятий отдельных ведомств в борьбе с оползнями. Она объединила организации, научные учреждения и отдельных специалистов, собрала разрозненные материалы, хранившиеся в разных ведомствах, и представила сведения по оползням во всем объеме для их разрешения в республиканских и союзных организациях. В результате была образована Госпланом при СНК УССР комиссия в соста-

---

---

**ЕЩЕ ОБ ИСТОРИИ ОДЕССКИХ ОПОЛЗНЕЙ**

---

---

ве И.А. Берштейна, Н.В. Трепугова и А.М. Дранникова, которой поручалось проверить проектно-изыскательские материалы, установить причины оползней и наметить пути борьбы с ними. В результате успешной работы этой комиссии был представлен в СНК УССР подробный доклад со всеми выводами.

11 мая 1939 г. СНК УССР вынес постановление “О мероприятиях по борьбе с оползнями в г. Одессе” и обязал Одесский областной комитет составить генеральную схему противооползневых мероприятий на Одесском побережье и ассигновал для этого 500 тысяч рублей. Следует отметить, что большое внимание борьбе с оползнями в Одессе уделяла IV Сессия Верховного Совета СССР, где по этому вопросу горячо выступал депутат Д.С. Коротченко, и II Сессия Верховного Совета УССР, где защищал намеченный комплекс мероприятий по борьбе с оползнями председатель Одесского Областного исполнительного комитета, депутат Н.Т. Кальченко. В результате указанных действий, на основании постановления СНК УССР было образовано Бюро проектирования противооползневых мероприятий при Одесском Облисполкоме, начальником и руководителем которого был назначен А.М. Дранников.

Итогом напряженной деятельности этого бюро явилась важная работа “Генеральная схема противооползневых мероприятий побережья города Одессы” [3], опубликованная под грифом «Для служебного пользования» в 1940 году. Над ней работал большой коллектив авторов. Так в ее написании принимали участие А.М. Дранников, Ю.Л. Шихман, Е.Е. Китран, А.Н. Кутейников (преподаватель ОИИМФа), Г.М. Зуб и В.Ф. Экерле. Кроме указанных авторов в проектировании участвовали: при выполнении геодезических работах проф. И.Д. Андросов и В.В. Родашевич, по поверхностному водоотводу Г.Е. Басс с бригадой, по геологии В.М. Ващенко и В.А. Фриш. Прделанная работа прошла серьезную экспертизу, получила общее признание и была рекомендована для утверждения в СНК УССР. В качестве экспертов участвовали такие видные ученые, как членкорреспондент Академии Наук СССР проф. Ф.П. Саваренский, проф. Н.Н. Джунковский, проф. В.Ф. Пчелинцев и проф. Н.В. Терпугов.

Приведем и проанализируем результаты, приведенные в Генеральной схеме, которые собственно подводят итог исследований по оползням на Одесском побережье за рассматриваемый здесь период времени. Во-первых, было дано наиболее полное и возможное на это время состояние оползневой зоны, ее геоморфология, геологическое строение, гидрогеология, гидрология моря и геотехнические свойства грунтов. Во-вторых, были проанализированы все ранее предложенные основные гипотезы образования Одесских оползней. Напомним, что гипотезы, существующие до 1920 г., были рассмотрены нами в ранее опубликованной статье [1], поэтому приведем только следующие две наиболее существенные гипотезы, предложенные после 1920 г.

В 1932 г. была организована Одесская оползневая станция, собравшая и обработавшая весь накопившийся геологический материал к

---

---

**ЕЩЕ ОБ ИСТОРИИ ОДЕССКИХ ОПОЛЗНЕЙ**

---

---

1938 году, который был изложен руководителем станции И.Я. Яцко в рукописи [4]. Вначале автор выделяет три типа оползней: I тип, когда известняки и вышележащие породы погружаются в меотическую породу, что приводит к большим деформациям всей толщи оползших и их подстилающих пород, вызывая выпучивание морского дна; II тип, когда весь оползневой процесс происходит не глубже красно-бурых глин; III тип, когда глыбы обвалившегося известняка накапливаются на пляже. (Состав грунтовых пород на склонах приведен в [1, 2]). Затем он обосновывает гипотезу образования оползней только для первого типа. Основным ее смысл собственно и заложен в определении оползней этого типа, приведенном выше. Следует подчеркнуть, что автор считает самой близкой к действительности гипотезу, предложенную И.Ф. Синцовым [1], в которой одним из основных факторов образования оползней отводится влиянию моря. В своей же гипотезе И.Я. Яцко роль моря в образовании оползней даже не упоминает. Также необходимо отметить существенные противоречия, встречающиеся в его изложении. Так в одном месте он отмечает, что меотические грунты в основном состоят из песков с незначительными пропластками глин, в которые погружаются все лежащие верхние породы. Но такое вдавливание в песчаный грунт по схеме Синцова вряд ли возможно. В другом же месте он пишет обратное “что меотические породы под опускающимся массивом не вдавливаются, а приподнимаются. Оседание же массива происходит, главным образом, за счет общего уменьшения мощности четвертичных пород”. Для объяснения причин образования оползней II и III типа И.Я. Яцко рекомендует проведение специальных исследований.

С 1926 года к изучению оползней вначале подключился Инженерно-дорожный трест, а затем Горкоммунотдел. Работами руководил гидрограф Е.Е. Китран. В своем докладе на конференции, созванной Горсоветом, он утверждал, что развитие оползней происходит снизу вверх. Их образование вызвано в основном действием волноприбоя, т. е. деятельностью моря, а подземным водам отводится минимальная роль. При этом, отмыв на дне моря, выпираемых в виде бугров оползневых пород, составляет 2/3 объема всех оползших пород, а отмыв берегового обрыва, составляет только 1/3 общей убыли суши. При этом выпирание и отмыв этих бугров, по его мнению, происходит только во время шторма, в тихую погоду этого не наблюдается. Эта гипотеза названа морской.

Приведенные здесь и в [1, 5] результаты показывают, что до появления Генеральной схемы единого мнения по вопросу причин образования оползней не существовало. Что же было в этом направлении предложено новое в указанной схеме. Для выявления состава меотических пород было пробурено несколько скважин. Они показали, что эта порода состоит в основном из глины, но не “тестообразного” или пластично-текучего состояния. Извлеченные образцы представляли весьма плотные твердые глины, погружение в которые возможно лишь на 1-3 см. Трение, сцепление и влажность этих глин также подтверждает их уплотненное, но не

---

---

**ЕЩЕ ОБ ИСТОРИИ ОДЕССКИХ ОПОЛЗНЕЙ**

---

---

текущее состояние. Перемещенные же в результате оползня меотические глины носили явные следы перемятия, давления и скалывающих усилий. На некоторых из них также наблюдались линии скольжения. Это все подтверждало не погружение в меотическую глину вышележащих пород, а их скольжение по некоторой поверхности. Следовательно, гипотеза Синцова о состоянии и влиянии этих глин на образование оползней не соответствует действительности.

Несостоятельность морской гипотезы подтверждается простыми наблюдениями. Так выпирание дна моря наблюдается не только во время штормов, но и при тихой погоде. Оползни в Одессе происходят даже там, где нет моря, но имеются интенсивные подземные воды. Да и трудно поверить в то, что сбрасываемые воды второго водоносного горизонта в среднем по  $112 \text{ м}^3/\text{час}$  на 1 км оползневых террас, не влияют на устойчивость побережья. Поэтому отрицание их роли несостоятельно. Например, там, где известняк второго водоносного слоя не дренирован, наблюдаются оползни.

Рассмотрим, какие же причины образования оползней на склонах побережья были предложены в Генеральной схеме. В разделе, который написал А.М. Дранников, оползни также подразделяются на три типа. Они почти не отличаются от типов, предложенных И.Я. Яцко. Только второй тип оползня по Дранникову захватывает слой известняка, а у Яцко он заканчивается над этим слоем. Рассмотрим первый тип оползней, у которых кривая скольжения проходит по лессу, красно-бурым глинам, известняку и глубоко задевает меотические глины, деформируя всю оползневую террасу, и заканчивается в море валом выпирания на расстоянии 40-60 м от уреза воды. Этот мощный тип оползней наиболее характерен и интересен для Одесских склонов, поэтому остановимся только на нем.

После очередного оползня, наступает равновесие склона от действия удерживающих и сдвигающих сил. В этом случае препятствуют скольжению отколовшегося массива оползшие породы, включая валы выпирания, возникающие в результате ранее происшедшего оползня. Они играют роль упора. Такое положение склона показано на рисунке 4.

Причиной образования оползней считается изменение баланса действующих сил (величина нагрузки или гидростатические условия) и баланса сопротивления (внутреннее трение и сцепление грунтов склона). Изменение действующих сил, удерживающих склон в устойчивом состоянии, происходит в результате отмыва волноприбоем моря грунта с береговой нижней террасы и валов выпора, как показано на рисунке 5. Уменьшение сил сцепления и угла внутреннего трения грунтов склона происходит от их увлажнения водой второго водоносного горизонта. Поверхности понтической и меотической глины от воздействия воды становятся скользкими, и вследствие этого происходит подвижка пород в склоне.

---

---

**ЕЩЕ ОБ ИСТОРИИ ОДЕССКИХ ОПОЛЗНЕЙ**

---

---



*Рис. 4. Вид склона после очередного оползня  
(на море видны валы вытора)*



*Рис. 5. Отмыв волноприбоем береговой зоны*

Каким образом зарождается и развивается оползень I типа? Оползни, как показывают наблюдения, могут происходить в течение нескольких дней или нескольких лет. При быстром оползне после образования закола, через несколько дней весь отколовшийся массив, лежащий

---

---

## ЕЩЕ ОБ ИСТОРИИ ОДЕССКИХ ОПОЛЗНЕЙ

---

---

выше меотических глин, вследствие своего веса и уменьшения сил сопротивления от воздействия подземных вод преодолевает силы сопротивления меотических глин и срезает их. Медленный оползень I типа обычно начинается с оползня III типа, т. е. вначале подвижки происходят только в лессе и красно-бурых глинах. Затем приходит в движение нижний трещиноватый известняк, который скользит по меотическим глинам. Скорость движения зависит от уменьшения сопротивляемости глин и от величины размываемой морем береговой зоны, являющейся упором для оползня. Такой процесс может продолжаться годами, например, как оползень на 11 станции Большого Фонтана, описанный выше (длился с 1932 по 1936 г.). Видим, что быстрые и медленные оползни I типа развиваются сверху вниз, а не снизу вверх, как принято по морской гипотезе.

В Генеральной схеме утверждается, что основными причинами образования оползневых процессов на склонах морского побережья Одессы являются подземные и наземные воды и море. Рекомендуются следующие мероприятия по блокированию их отрицательных воздействий на склоны. Рассмотрим эти мероприятия, направленные по склону сверху вниз.

Вначале установим, как предлагалось ликвидировать отрицательные последствия воды на склоны. Для сброса выпадающих атмосферных осадков необходимо устраивать водопроводящие сети в виде лотков и нагорных канав, не допуская перелив воды через бровку плато, вызывающее увлажнение грунтов склона. Перехват вод первого водоносного горизонта следует осуществлять с помощью вертикальных сквозных фильтров в виде скважин большого диаметра, заполненных специально подобранным фильтрующим материалом. При этом скважины доводятся до кровли галереи, в которую и будет затем поступать дренируемая вода. Для перехвата вод второго водоносного горизонта необходимо на расстоянии 100-120 м от бровки в сторону плато возводить нормально потоку этих вод и параллельно берегу дренажные галереи, в которые, как уже отмечено выше, будут сбрасываться также воды первого горизонта. Такие галереи сооружаются в понтическом известняке, их подошва опирается на понтическую или меотическую глину. Таким образом, будет также уменьшено количество воды попадающей на оползневые террасы.

Разрушающее действие волноприбоя моря можно существенно уменьшить путем сооружения на расстоянии 60-80 м от береговой линии надводных или подводных волноломов, которые будут ослаблять силу волн на 50-55 %. Они также будут поддерживать образование пляжа, сохраняя его от размыва. Не рекомендуется устройство волноотбойных стен без волнолома, это, как видно на рисунках 6 и 7, приведет их к подмыву и к постепенному разрушению. Вопрос о роли бун в берегоукреплении не рассматривался.

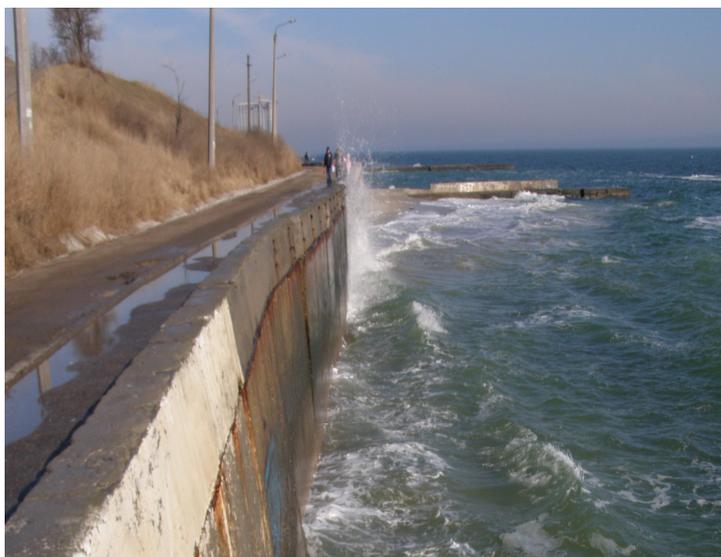
---

---

**ЕЩЕ ОБ ИСТОРИИ ОДЕССКИХ ОПОЛЗНЕЙ**

---

---



*Рис. 6. Первая стадия: начало подмыва стенки*



*Рис. 7. Вторая стадия: вымыв грунта за стенкой, затем ее разрушение*

Существенной частью мероприятий по борьбе с оползнями должно было явиться введение специального противооползневого режима, по которому запрещались вести на побережье следующие работы. Это выемка песка на пляже, производство на склонах земляных работ, проектиро-

---

---

**ЕЩЕ ОБ ИСТОРИИ ОДЕССКИХ ОПОЛЗНЕЙ**

---

---

вание и строительство сооружений без соответствующего согласования, неправильный сброс атмосферных вод, устройство биофильтров на оползневой террасе, подача морской воды на плато и сброс отработанной воды в море системой водопроводов, дающих утечку в грунт.

На разработанном плане Генеральной схемы противооползневых мероприятий были изображены предложенные различного типа подводные и надводные волноломы, дренажные галереи и волноотбойные стенки. Строительство всех необходимых работ было разделено на три очереди.

Следует особо отметить, что в Генеральной схеме кроме качественных исследований оползневых процессов впервые для Одесских склонов были выполнены их количественные приближенные оценки в виде расчетов устойчивости по круглоцилиндрической поверхности скольжения. Однако трудно поверить, особенно глядя, например, на рисунок 8, что Одесские оползни I типа когда-то перемещались или будут перемещаться по такой поверхности, как абсолютно жесткое тело, принятое в этих расчетах.



*Рис. 8. Рядовой оползень на Одесских склонах*

Разработанным мероприятиям в Генеральной схеме по остановке оползневого процесса на Одесских склонах не суждено было осуществиться из-за начавшейся в 1941 г. войны. Войны, как и оползни, способны только к разрушению, созидания им чужды. После войны основные силы и средства страны были направлены на восстановление огромных разрушений и ликвидацию общественных противоречий, ею вызванных, поэтому склоны были предоставлены сами себе и оползни продолжали совершать над ними свое черное дело.

---

---

**ЕЩЕ ОБ ИСТОРИИ ОДЕССКИХ ОПОЛЗНЕЙ**

---

---

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Гришин В.А. Из истории Одесских оползней // *Вісник ОНМУ*. – № 30. – 2010. – С. 156-170.
2. Гришин В.А., Снисаренко В.И. *Одесские склоны и оползни*. – К.: МП Леся, 2008. – 300 с.
3. *Генеральная схема противооползневых мероприятий побережья гор. Одессы*. – Одесса, 1940. – 190 с.
4. Яцко И.Я. *Геологическая съемка оползневой зоны Одесского побережья*. – Рукопись, 1938.
5. Мушкетов Д.И., Погребов Н.Ф. *Одесские оползни* // *Известия Геологического комитета*. – Т.43. – Вып. 8. – 1924. – С. 176-184.

*Надійшла 30.03.2011*

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор генеральний директор Морського інженерного бюро **Г.В. Єгоров**.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА  
ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

---

---

*Рассматривается алгоритм расчетного анализа судовых конструкций со случайными характеристиками. Подчеркивается актуальность редуцирования конечно-элементной модели на базе использования гипотезы о постоянстве форм свободных колебаний конструкции в процессе оптимизации ее фрагментов по итерационной схеме.*

*Розглядається алгоритм розрахункового аналізу судових конструкцій із випадковими характеристиками. Підкреслюється актуальність редуціювання кінцево-елементної моделі на основі використання гіпотези про постійність форм вільних коливань конструкції в процесі оптимізації її фрагментів за ітераційною схемою.*

*The algorithm of calculation analysis of ship constructions is examined with casual descriptions. Actuality of reduction of certainly-element model is underlined on the base of the use of hypothesis about constancy of forms of free vibrations of construction in the process of optimization of its fragments on a iterational chart.*

**Ключевые слова:** судовые конструкции, случайные характеристики, оптимизация.

**Актуальность.** Желание проектировщиков обеспечить надежность судовых конструкций минимальными средствами приводит к задаче оптимизации, т.е. отысканию экстремума функции качества в заданной области, очерченной рядом ограничений. При этом управляемыми параметрами проектирования, как правило, являются параметры жесткости (геометрические характеристики сечений и т.п.), весовые или другие показатели конструктивных элементов.

Заметим, что современный уровень культуры проектирования судовых конструкций, предполагающий активное использование методов их оптимизации по различным критериям качества, во многом определяет коммерческую привлекательность проектных решений. Решение задач оптимального проектирования является сложной технико-экономической проблемой, которая может быть сформулирована как задача математического программирования по отысканию экстремума некоторого критерия качества, функционально зависящего от вектора параметров проектирования  $x$ . Подобные задачи в последнее время обретают все большую практическую значимость [1].

— В зависимости от вида функции цели  $\Phi_{ц}$ , наличия и вида ограничений  $f(x) = 0$ , применяются те или иные методы математического програм-

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА  
ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

---

мирования (линейные, нелинейные, динамическое программирование, методы случайного поиска и др.).

Практические результаты оптимизации реальных судовых конструкций могут быть получены лишь при использовании численных методов прямого анализа в сочетании с одним из методов оптимизации на базе определенных упрощающих гипотез [2], использование которых, особенно при оптимизации конструкций, подверженных динамическим нагрузкам, приводит к существенной экономии вычислительных ресурсов.

**Постановка задачи.** Решая, например, задачу модернизации путем оптимального выбора параметров жесткости рассматриваемого района конструкции, целесообразно ввести гипотезу о постоянстве форм свободных колебаний в процессе итерационного динамического расчета.

Спектр собственных частот конструкции определится формулой Рэлея

$$\Lambda = \sum_e \{V_e\}^T [K_e] \{V_e\}, \quad (1)$$

где  $\Lambda$  – квадрат контролируемой собственной частоты (удвоенная величина потенциальной энергии системы),

$\{V_e\}$  – соответствующая форма свободных колебаний конечного элемента (КЭ) в составе дискретной модели, нормированная по кинетической энергии следующим образом:

$$\sum_e \{V_e\}^T [I_e] \{V_e\} = 1, \quad (2)$$

где  $[K_e]$ ,  $[M_e]$  – матрица жесткости и матрица масс КЭ соответственно;  $e = 1, \dots, n$  – номера КЭ.

Судовые корпусные конструкции можно рассматривать как стержневые системы, воспринимающие различные нагрузки в процессе эксплуатации судна. Как правило, стержневая аппроксимация элементов судового корпуса достаточно полно отражает индивидуальные особенности конструкции и распределение полей напряженно-деформированного состояния (НДС) при действии эксплуатационных нагрузок. Поэтому стержневая модель широко используется в практике прямого расчетного анализа реальных конструкций. Более подробную информацию о распределении жесткостей и масс, а также полей НДС можно получить при рассмотрении пластинчато-стержневых моделей судового корпуса. Следует подчеркнуть, что универсальность МКЭ позволяет с успехом использовать в оптимизационных задачах достаточно сложные модели ценой соответствующего увеличения вычислительного ресурса.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА  
ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

---

В настоящее время является общепризнанной необходимостью учета вероятностного характера моделей реальных судовых конструкций и условий их работы [3]. Ряд факторов случайного характера (воздействие окружающей среды, эксплуатационные нагрузки, коррозионные процессы и т.п.) затрудняют обоснованное использование детерминированных математических моделей состояния при прочностном анализе элементов судового корпуса, особенно при действии динамических нагрузок.

В качестве ограничений в таких задачах, как правило, рассматриваются напряжения  $\{s\}$  в КЭ, которые в рамках МКЭ при принятых допущениях вычисляются как

$$\{s_e\} = [L_e] \sum_k a_k \{V_{ke}\}, \quad (3)$$

где  $[L_e]$  – матрица напряжений;

$a_k = Q_k / \Lambda_k$  – весовой коэффициент при  $k$ -й нормированной форме свободных колебаний рассматриваемого КЭ,

$Q_k = \{V_k\}^T \{P\}$  – обобщенная нагрузка, соответствующая  $k$ -й частоте.

Контролируемыми параметрами, по-видимому, можно считать геометрические характеристики КЭ.

В правой части (3) от контролируемых параметров зависят матрица  $[L_e]$  и скаляр  $\Lambda$ , определяемый в соответствии с (1) матрицей  $[K_e]$ . Таким образом, становится возможным установить приближенную зависимость статистик напряжений со статистиками контролируемых параметров еще на стадии формирования результирующего уравнения состояния. Так каждому  $m$ -му элементу вектора  $\{s\}$  можно поставить в соответствие некоторую дифференцируемую функцию вектора контролируемых параметров

$$s_m = f_m \{x\}. \quad (4)$$

При нормальном распределении элементов вектора  $\{x\}$ , определяющего  $f\{x\}$ , можно связать статистики функции и аргумента [4]. Пользуясь разложением в ряд Тейлора правой части (4) в окрестности математического ожидания  $\{\mu_x\}$  вектора  $\{x\}$ , получим

$$s_m \approx f_m \{\mu_x\} + \sum_i \frac{\partial f_m \{x\}}{\partial x_i} \Big|_{x=\mu} (x_i - \mu_i) + \frac{1}{2!} \sum_i \sum_j \frac{\partial^2 f \{x\}}{\partial x_i \partial x_j} \Big|_{x=\mu} (x_i - \mu_i)(x_j - \mu_j) + \mathfrak{R}. \quad (5)$$

Если элементы вектора  $\{x\}$  – независимые случайные величины, то после исключения нулевых слагаемых и остаточного члена, путем применения момента второго порядка для левой и правой частей (5), получим

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА  
ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

---

$$\mu_s \approx f\{\mu_x\} + \frac{1}{2} \sum_i \left. \frac{\partial^2 f\{x\}}{\partial x_{i2}} \right|_{x=\mu} \sigma_{x_i}^2 \quad (6)$$

Аналогично, используя разложение (5), можно также вычислить среднеквадратичное отклонение  $s_m$

$$\sigma_s^2 \approx \sum_i \left( \left. \frac{\partial f\{x\}}{\partial x_i} \right|_{x=\mu} \sigma_{x_i} \right)^2 \quad (7)$$

При оптимизации сложных судовых конструкций по критерию металлоемкости возникает необходимость многократного расчета динамической задачи. Поскольку высокий порядок математической модели со случайными характеристиками создает определенные затруднения при ее реализации, приходится идти на различного рода допущения, упрощающие решение этой сложной и ответственной задачи.

В последнее время наблюдается относительный рост объема отказов усталостного происхождения, обусловленных резонансными колебаниями элементов судового корпуса.

Рост числа поврежденных усталостного характера объясняется повышением интенсивности эксплуатации облегченных конструкций, спроектированных по уточненным схемам с минимальными запасами статической прочности и, как следствие, повышенным риском смещения частотного спектра в зону резонансных колебаний.

Главным условием надежной работы конструкции при действии динамических нагрузок является достаточный «запас» по частоте, обеспечивающий отсутствие резонансных явлений. Как правило, выход из резонансной зоны осуществляется путем модернизации конструкции в целом или отдельных ее фрагментов, заключающейся в перераспределении жесткостей (иногда масс или других параметров). При этом, выбор наиболее эффективного способа вывода конструкции из резонансной области представляет самостоятельную и довольно сложную задачу расчетного проектирования.

При решении задач рассматриваемого типа представляется актуальной разработка упрощенных динамических моделей, позволяющих выполнять расчетное обоснование рациональной отстройки частотного спектра от резонансной области без чрезмерных затрат вычислительных ресурсов [1]. Упрощение модели базируется на гипотезе о неизменяемости форм свободных колебаний конструкции в процессе ее модернизации.

Вычисление частотного спектра по формуле (1) позволяет выполнить сравнительный анализ эффективности увеличения (или уменьшения) жесткости отдельных конечных элементов или района конструкции при отстройке от резонансной области частот, а также определить необходи-

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА  
ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

---

мую жесткость, обеспечивающую наперед заданное увеличение (уменьшение) собственной частоты конструкции в целом. Для этого следует представить общую потенциальную энергию в виде суммы

$$\Lambda = \Lambda_c + \Lambda_m, \quad (8)$$

где  $\Lambda_m$  – потенциальная энергия колебаний  $m$  элементов конструкций модернизируемого района,

$\Lambda_c$  – то же остальных элементов, не модернизируемых районов конструкции.

Приняв гипотезу о постоянстве форм свободных колебаний конструкции, получим алгоритм многократной реализации (4) при вариации параметров жесткости  $m$  элементов модернизируемого района

$$\Lambda_m = \sum \{Vi\}^T [Ki] \{Vi\}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (9)$$

$$\Lambda_c = \sum \{Vi\}^T [Ki] \{Vi\} = const, \quad i = 1, 2, 3, \dots, (n - m). \quad (10)$$

Здесь  $[Ki]$  и  $\{Vi\}$  – матрица жесткости и форма свободных колебаний соответственно  $i$  – го конечного элемента.

На втором, этапе выполняется уточненный расчет модернизированной конструкции с расчетными оптимальными параметрами жесткости и распределением масс.

Рассмотрим алгоритм реализации подобной задачи на примере отстройки первой резонансной частоты колебаний стержня путем изменения инерционных параметров.

Расчетная схема конструкции приведена на рис.1. Конструкция представляет балку на двух опорах с пролетами длиной  $l$ , несущую три массы: одну точечную массу  $M$  и две массы вращения  $J_m = Ml^2$ . Таким образом, данная система имеет три динамические степени свободы. Требуется вычислить минимальную величину момента инерции вращения массы  $J_m$  на консоли, обеспечивающую отстройку резонансной частоты по первой форме колебаний на 30 %.

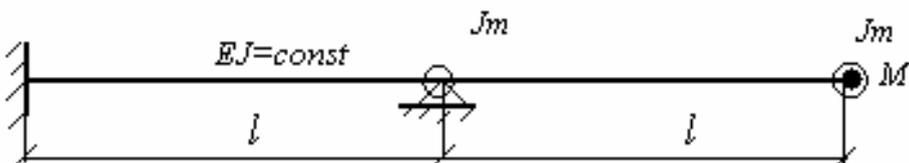


Рис. 1. Расчетная схема балки

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА  
ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**1. Расчет параметров свободных колебаний системы.** Расчет свободных колебаний выполняем в рамках метода конечных элементов.

Как видим, система имеет три динамические степени свободы (см. рис. 2).

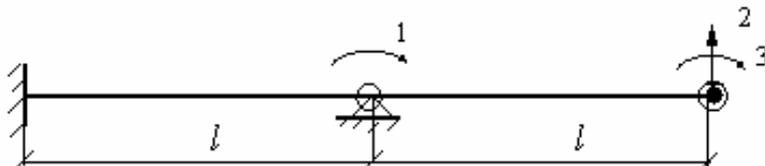


Рис. 2. Возможные узловые обобщенные перемещения системы

Частотное уравнение упругой конструкции получим из условия нетривиальности решения однородного уравнения форм свободных колебаний

$$([K] - \Lambda[M])\{V\} = 0.$$

Это уравнение имеет нетривиальное решение при условии равенства нулю соответствующего определителя, что и приводит к частотному уравнению

$$\Delta(\Lambda) = |[K] - \Lambda[M]| = 0.$$

Матрица масс содержит лишь диагональные элементы, соответствующие номерам инерционных узловых параметров. В таком случае частотное уравнение принимает следующий вид:

$$\Delta(\Lambda) = \left| EJ / l^3 \begin{bmatrix} 8l^2 & -6l & 2l^2 \\ -6l & 12 & -6l \\ 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} - \Lambda \begin{bmatrix} J_m & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & J_m \end{bmatrix} \right| = 0.$$

Введем безразмерный частотный параметр  $\kappa = Ml^3 \Lambda / EJ$  (равенство нулю определителя позволяет опустить размерность элементов матриц)

$$\Delta(\kappa) = \begin{vmatrix} (8 - \kappa) & -6 & 2 \\ -6 & (12 - \kappa) & -6 \\ 2 & -6 & (4 - \kappa) \end{vmatrix} = 0.$$

Решая кубическое уравнение  $\Delta(\kappa) = 0$ , получим следующие корни:

$$\kappa_1 = 0,551, \quad \kappa_2 = 4,625, \quad \kappa_3 = 18,85.$$

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА  
ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

---

Последовательно подставляя эти корни в однородное уравнение форм свободных колебаний и решая его с точностью до постоянного сомножителя, получим

$$\begin{aligned}\{V_1\} &= (1 \quad 2,492 \quad 3,756); \\ \{V_2\} &= (1 \quad 0,388 \quad -0,524); \\ \{V_3\} &= (1 \quad -1,530 \quad 0,756).\end{aligned}$$

Свойства ортогональности форм позволяют использовать полученную информацию на этапе анализа напряженно-деформированного состояния конструкции при действии динамических сил.

$$\begin{aligned}\{V_1\}^T * \{V_2\} &= 1*1+2,492*0,388-3,756*0,524 = 0; \\ \{V_1\}^T * \{V_3\} &= 1*1-2,492*1,530+3,756*0,756 = 0; \\ \{V_2\}^T * \{V_3\} &= 1*1-0,388*1,530-0,524*0,756 = 0.\end{aligned}$$

**2. Решение задачи отстройки резонансной частоты.** В нашем случае в качестве резонансной принята низшая частота свободных колебаний, соответствующая безразмерному частотному параметру  $\kappa = 0,551$ .

Для решения вопроса отстройки резонансной частоты посредством изменения величины  $J_m$  на консоли воспользуемся формулой Релея. Принимая гипотезу о постоянстве форм свободных колебаний в процессе модернизации конструкции, получим для  $i$ -й частоты

$$\kappa_i = \{V_i\}^T [K] \{V_i\} / \{V_i\}^T [M] \{V_i\}, \quad (i=1,2,3).$$

По-видимому, отстройка частоты влево от резонанса потребует увеличения знаменателя в правой части формулы.

Вычислим первоначальное значение кинетической энергии на первой частоте

$$T_1 = \{V_1\}^T [M] \{V_1\} = 1*1+2,492^2*1+3,756^2*1 = 21,3.$$

Соответствующее значение потенциальной энергии

$$P_1 = \{V_1\}^T [K] \{V_1\} = 11,75.$$

Требуемое значение приращения момента инерции вращения на консоли  $\delta J_m$  для изменения частоты на 30 % определим по формуле Релея

$$11,75 = 0,7^2 \kappa (21,3 + \delta J_m), \quad \text{т.е. } \delta J_m = 1,57.$$

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА  
ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

---

Оценим эффективность модернизации путем прямого расчета частотного спектра конструкции

$$\Delta(\kappa) = \begin{vmatrix} (8-\kappa) & -6 & 2 \\ -6 & (12-\kappa) & -6 \\ 2 & -6 & (4-2,57\kappa) \end{vmatrix} = 0.$$

Развернутая форма определителя имеет вид

$$\kappa^3 - 21,5\kappa^2 + 75,5\kappa - 18,68 = 0.$$

Первые два корня определяем методом сканирования (предварительно оценив интервал их расположения на оси  $\kappa$ ), третий корень вычислим с использованием формулы Виетта.

Для определения интервала первых корней выполним анализ производной последней функции

$$3\kappa^2 - 43,0\kappa + 75,5 = 0, \text{ откуда } \underline{\kappa}_1 = 2,1; \underline{\kappa}_2 = 12,0.$$

Таким образом, интервал нахождения корней

$$0 < \kappa_1 < 2,1; \quad 2,1 < \kappa_2 < 12,0.$$

Уточняя положение методом сканирования, можно получить

$$\kappa_1 = 0,265; \quad \kappa_2 = 4,1.$$

Используя теорему Виетта о произведении корней, получим

$$\kappa_3 = \frac{18,68}{0,265 \cdot 4,1} = 17,2.$$

Сопоставление частотных гистограмм исходной и модернизированной систем (см. рис. 3) дает представление об эффективности конструктивной защиты от резонансных явлений.

**Вывод.** Принятые допущения вполне могут быть приняты в качестве инструмента оперативной оценки эффективности отстройки конструкции от резонансной частоты в заданном интервале частот.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА  
ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

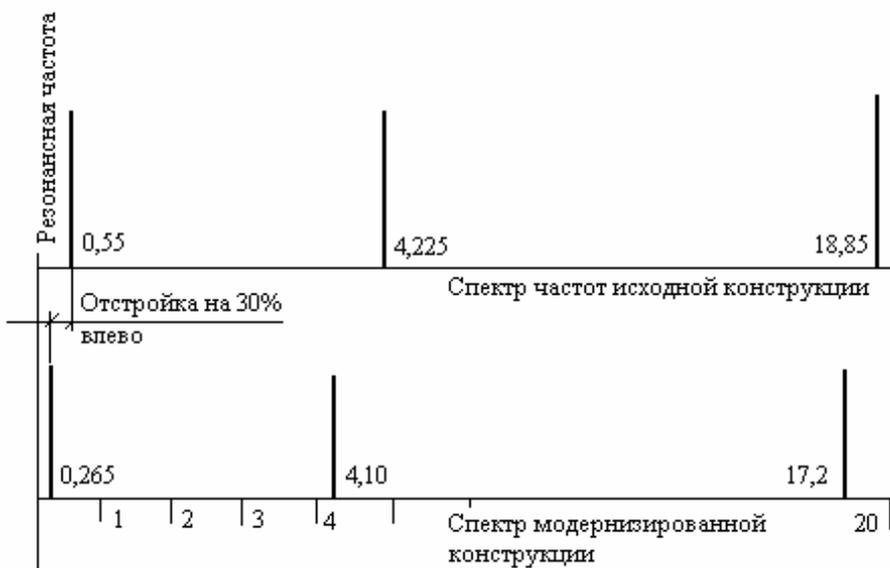


Рис. 3. Сопоставление частотных спектров  $L_i$

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лукаш Э.П., Олейников В.В., Лазарев А.А. Расчетное обоснование модернизации судовых конструкций при динамических нагрузках // Тезисы докладов на Международной конференции по строительной механике корабля памяти проф. Папковича П.Ф. – СПб., 2009.
2. Лукаш Э.П., Олейников В.В. Многокритериальная оптимизация при проектировании судовых конструкций // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2006. – Вип. 18.
3. Лукаш Э.П., Олейников В.В. Совершенствование алгоритма оптимизации судовых конструкций // Конференция по строительной механике корабля, посвященная памяти акад. Ю.А. Шиманского: Тезисы докладов. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2008.
4. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. – М.: Мир, 1980. – 600 с.

Надійшла 22.03.2011

**Рецензент** – кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри «Теорія та проектування корабля» Одеського національного морського університету **С.М. Баскаков**.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАЛУБ НАКАТНЫХ СУДОВ

*Изложены особенности проектирования палуб накатных судов для уменьшения их веса.*

*Викладено особливості проектування палуб накатних суден задля зменшення їх ваги.*

*The especial planning of decks of Ro-RO ships for diminishing of their weight.*

**Ключевые слова:** накатные суда, палуба, бимсы, карлингсы, продольные балки, настил палубы, минимальный вес.

**Постановка проблемы:** За период 2006-2009 гг. на кафедре Теории и устройства судна ОНМА производилась проверка прочности конструкций целого ряда накатных судов, построенных по Правилам различных классификационных обществ. Было установлено значительное разнообразие их конструкций и марок материала корпусов даже для судов с близкими главными размерениями.

*Таблица 1*

*Характеристики накатных судов*

	m/v «AVIVA»	m/v «ETEL»	m/v «FAIVA»	m/v «VIKING»
Год постройки	1982	1977	1978	1983
Регистр	испанский	РС	NV	NV
Лр, м	128,2	113,4	152,5	69,6
Карлингсы на главной палубе	3	1 двоен. в ДП	1 в ДП	1 в ДП
Расстояние между пиллерсами в ДП м	–	8,5	12	–
Нагрузка ось, т / гомогенная, кПа	16/15	55/30	27/30	–/20
Толщина главной палубы (ГП), мм	12	18	13	9
Сталь ГП	395	360	355	295

Это относится в первую очередь к конструкциям палуб, составляющих значительную часть веса корпуса судна. Возникает вопрос – возможно ли спроектировать палубу накатного судна таким образом, чтобы добиться минимизации её веса.

---

---

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАЛУБ НАКАТНЫХ СУДОВ**

---

---

**Цель статьи (постановка задачи).** В работе рассмотрены вопросы выбора оптимальной по весу конструкции палуб накатных судов при разных главных размерах.

**Изложение материала исследования с обоснованием полученных результатов.** У палубных перекрытий накатных судов отсутствуют опоры в виде поперечных переборок. Палубы накатных судов выполняются по продольной системе набора, несмотря на избыточную общую прочность, вследствие высокого борта и многопалубности. Продольные балки при этом играют роль ребер жесткости и устанавливаются для уменьшения толщины палубного настила.

Проектирование палуб оптимального веса на накатном судне предполагает два аспекта:

- проектирование оптимальной по массе несущей решетки, состоящей из рамных бимсов, карлингсов и пиллерсов,
- проектирование настилов и продольных балок минимального веса.

Создание несущей решетки реализуется по разному.

1. На малых судах при небольшой ширине и при невозможности установки пиллерсов по соображениям проезда колесной техники, рамные бимсы устанавливаются от борта до борта. Это значительно утяжеляет конструкцию.

2. Если ширина судна позволяет, то без ущерба для грузовых операций устанавливается один ряд пиллерсов в диаметральной плоскости. В плоскости пиллерсов устанавливают карлингс, на который опираются рамные бимсы. Наиболее распространенной схемой является установка пиллерсов на расстоянии 10-18 м друг от друга. Эпюра изгибающего момента крайних бимсов не зависит от жесткости карлингса, так как они опираются непосредственно на пиллерсы. По мере усиления жесткости карлингса уменьшается пролетный момент промежуточных бимсов. **Критической жесткостью** карлингса можно назвать такую его жесткость, когда изгибающие моменты промежуточных бимсов в пролете будут такими же, как у крайних бимсов.

Нет необходимости увеличивать момент инерции карлингса выше критического. Учитывая, что все бимсы делаются одинаковыми, уменьшение момента инерции карлингса приводит к неравномерной работе бимсов и утяжеляет палубную конструкцию. Размеры карлингса, рекомендуемые Правилами Регистра  $W = Q L 10^3 / m k \sigma$  [1] примерно соответствуют карлингсу критической жесткости, где  $Q = p a L$ ,  $a$  – половина ширины судна,  $L$  – расстояние между пиллерами.

3. Если средний карлингс сильно загружен, устанавливают боковой карлингс, который воспринимает часть нагрузки среднего карлингса. Однако, такая конструкция не рациональна, так как отсутствуют жесткие опоры под боковыми карлингсами и они в значительной степени являются только разносящими связями. Установка дополнительного ряда пиллерсов невозможна – это мешает грузовым операциям.

---

---

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАЛУБ НАКАТНЫХ СУДОВ**

---

---

По мере удаления бокового карлингса от центрального его эффективность падает и тогда следует усиливать крайний бимс в плоскости пиллерса до некоторой критической жесткости. Ширина грузовой площади такого усиленного бимса равна расстоянию между пиллерсами. При этом, боковой карлингс начинает работать более рационально, опираясь на усиленный бимс как на жесткую опору. Существует оптимальное соотношение жесткостей промежуточных и крайних бимсов, боковых и центрального карлингса с учетом разных граничных условий бимсов по борту. Подобрать такое соотношение, можно добиться снижения общего веса палубной конструкции.

По такой же схеме возможна установка нескольких боковых карлингсов.

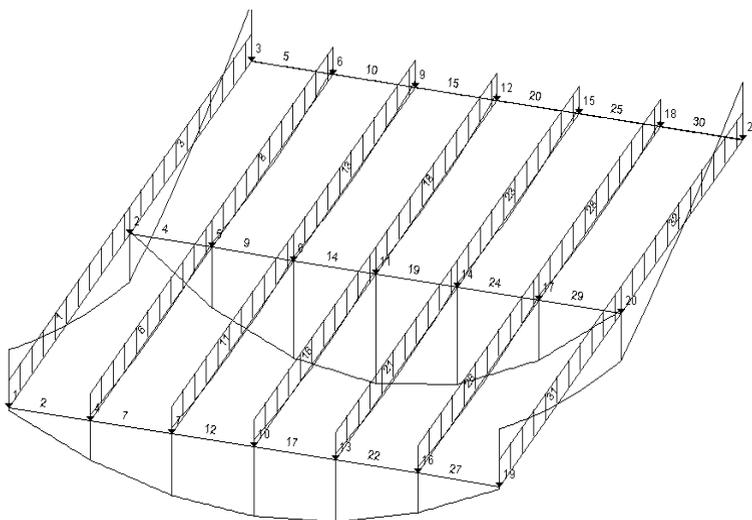
Из приведенного анализа вытекает рациональная конструкция палуб накатного судна с учетом его главных размерений.

Второй аспект этой проблемы – количество материала, заложенного в настил и продольные балки. Задача распределения металла между настилом и продольными балками, обеспечивающими восприятие давления колес от накатной техники, практически имеет единственное решение. Влияние размера шпации на суммарный вес – настил плюс продольные балки, незначительно. При уменьшении шпации толщина палубного настила, размеры продольных балок и суммарный вес могут быть уменьшены только до величин, ограниченных минимальными толщинами. Для экономии же веса в процессе проектирования допускается остаточная погиб панелей пластин и продольных балок путем снижения коэффициентов запаса так, чтобы фактическая погиб их в процессе эксплуатации судна не превышала допустимую в конце штатного срока эксплуатации,  $f\phi < f\phi_{\text{доп}}$ . В своё время в проекте № 1609, т/х «Инженер Ермошкин», за счет такого допущения достигнута экономия веса примерно 400 т по 100 т на каждую палубу.

Такая концепция не нова, например, для нижнего пояса поперечных переборок на сухогрузе при затоплении трюма допускается остаточная погиб обшивки.

Анализ работы конструкции осуществлен с помощью расчетного комплекса SKAD. Расчет производился для участка палубы шириной равной половине ширины судна и длиной равной расстоянию между пиллерсами, установленными в диаметральной плоскости. Система набора – продольная, пиллерсы приняты абсолютно жесткими, варьировалось положение бокового карлингса от  $C = 0,22$  до 0,6 пролета рамного бимса и коэффициент опорной пары бимсов на бортах от жесткой заделки до  $\chi = 0,7$ , рис.1. Нагрузка на прилежащих участках палубы принималась равной нулю или симметричной, учитывалась сдвиговая жесткость балок, анализировались эпюры перерезывающих сил, изгибающих и крутящих моментов. Некоторые результаты расчетов приведены ниже.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАЛУБ НАКАТНЫХ СУДОВ**



*Рис.1. Расчетная схема секции палубного перекрытия между двумя пиллерсами и эпюра изгибающих моментов. В точках 1 и 19 установлены пиллерсы*

В табл.2 даны отношения:

– пролетных моментов  $M_b/M_{b0}$  в среднем рамном бимсе при разных положениях бокового карлингса к пролетному моменту в среднем рамном бимсе без бокового карлингса;

– пролетных моментов  $M_k/M_{k0}$  в боковом карлингсе при разных значениях  $C$  к пролетному моменту в центральном карлингсе при отсутствии боковых карлингсов;

– пролетных моментов  $M_b/M_{b0}$  в среднем бимсе при различных закреплениях рамных бимсов у борта к опорному моменту в среднем бимсе при отсутствии бокового карлингса.

*Таблица 2*

*Соотношение пролетных моментов*

Мб/Мбо С	$\chi$			
	1	0,9	0,8	0,7
0,2	0,833	0,850	0,861	0,879
0,4	0,572	0,621	0,679	0,698
0,6	0,297	0,311	0,362	0,398
Мк/Мко С	$\chi$			
	1	0,9	0,8	0,7
0,2	0,484	0,489	0,490	0,491
0,4	0,381	0,384	0,387	0,389
0,6	0,259	0,262	0,267	0,268
Мб/Мбо С	$\chi$			
	1	0,9	0,8	0,7
0	0,393	0,415	0,455	0,489
0,2	0,348	0,387	0,410	0,461
0,4	0,249	0,311	0,360	0,389

---

---

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАЛУБ НАКАТНЫХ СУДОВ**

---

---

**Выводы.** Палубы накатных судов составляют существенный процент веса корпуса, поэтому любая возможность оптимизации их конструкции представляет интерес, уменьшая стоимость судна при постройке.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Бойцов Г.В., Палий О.М. Прочность и конструкция корпуса судов новых типов / Г.В.Бойцов. – Л.: Изд-во Судостроение, 1979. – 358 с.*
2. *Емельянов М.Д. Рациональное проектирование палубных перекрытий беспереборочных судов / М.Д.Емельянов // Сб. научн. трудов ЦНИИМФ «Прочность судов и защита судовых конструкций от коррозии и обрастания». – Л.: Транспорт, 1987. – 85-66 с.*

*Надійшла 25.04.2011*

**Рецензент** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Одеського національного морського університету **Е.П. Лукаш.**

**МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ  
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КРАНОВЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ  
ПО ПАРАМЕТРАМ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ  
И КОЭФФИЦИЕНТА ВАРИАЦИИ ТВЕРДОСТИ**

---

---

*По данным Госгорпромнадзора Украины в стране сложилась сложная ситуация в сфере эксплуатации подъемно-транспортного оборудования. Большинство кранов на сегодняшний момент исчерпало свой нормативный ресурс. При этом не существует единой универсальной методики, на основании которой можно принять решение о продолжении эксплуатации, либо списании таких кранов. В статье предлагается метод решения этой задачи, основанный на параметре коэрцитивной силы. Указаны преимущества этого метода по отношению к используемым на сегодняшний момент.*

*За даними Держгірпромнагляду України в країні склалася складна ситуація в області експлуатації підйомно-транспортного устаткування. Більшість кранів на теперішній момент вичерпало свій нормативний ресурс. При цьому не існує єдиної універсальної методики, на підставі якої можна прийняти рішення щодо продовження експлуатації, або списання таких кранів. У статті пропонується метод вирішення цієї задачі, заснований на параметрі коерцитивної сили. Вказані переваги цього методу по відношенню до методів, що використовуються на сьогоднішній момент.*

*According to Gosgorpromnadzor Ukraine in the country, a difficult situation in the field of lifting and handling equipment. Most of the cranes has exhausted residual life. In this case, there is no single universal technique, based on which one can decide to continue operating, or cancellation of such cranes. The paper proposes a method to solve this problem based on the parameter of coercive force. These advantages of this method in relation to those used to date.*

**Ключевые слова:** *остаточный ресурс, металлоконструкции грузоподъемных машин, усталостная поврежденность, коэрцитивная сила, коэффициент вариации твердости.*

Грузоподъемные машины используются в большинстве отраслей народного хозяйства как основные либо вспомогательные средства механизации производства. Выход из строя кранов, находящихся в составе технологической линии может привести к остановке всего предприятия на долгое время. А в связи с тем, что парк перегрузочной техники с каждым годом только стареет, возникает риск серьезной аварии кранов, вследствие выработки ими нормативного ресурса. Однако собственники не уделяют достаточного внимания этой проблеме и продолжают эксплуатировать потенциально опасную технику.

**МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ  
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КРАНОВЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ  
ПО ПАРАМЕТРАМ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ  
И КОЭФФИЦИЕНТА ВАРИАЦИИ ТВЕРДОСТИ**

---

---

Естественно, не все перегрузочные машины, отработавшие свой нормативный срок службы, являются аварийно опасными. Их эксплуатацию можно продлить на некоторый промежуток времени, который определяется по результатам полного обследования крана. Резерв ресурса перегрузочных машин может существовать за счет следующих причин:

- работа крана на протяжении всего периода эксплуатации в более легком режиме работы, чем проектный;
- большие коэффициенты запаса прочности, заложенные при проектировании.

Однако существуют и такие перегрузочные машины, которые уже достигли своего предельного состояния к моменту окончания нормативного ресурса. Одна из основных задач эксперта и заключается в том, чтобы выделить из общего числа кранов те, которые достигли предельного состояния, и запретить их дальнейшую эксплуатацию.

Для решения этого вопроса возможно использование различных методов, которые позволяют определить степень накопленного повреждения узлов металлоконструкций. До недавнего времени были широко распространены разрушающие методы контроля механических свойств металла крановых металлоконструкций. Идея метода заключается в том, что из металла, вырезанного из наиболее опасных узлов металлоконструкции, изготавливаются образцы и производятся испытания для определения его механических свойств. О степени поврежденности металла судят по разнице между полученными экспериментально величинами, характеризующими механические свойства металла крана и значениями, указанными в ГОСТах. Такой метод обладает рядом существенных недостатков:

- необходимость проведения ремонтных работ с применением сварки в наиболее опасном месте;
- необходимость в разгрузке металлоконструкции до вырезки образцов для испытания;
- ослабление опасного места сварными швами, затраты на ремонт и так далее.

В настоящее же время широкое распространение получил метод оценки состояния и прогнозирования остаточного ресурса крана на основе неразрушающего контроля (коэрцитивной силы, коэффициента вариации твердости), который является более предпочтительным.

**Целью данной работы** является разработка метода оценки остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных машин, основанного на параметре коэрцитивной силы и коэффициенте вариации твердости.

В настоящее время в Украине действуют методические указания [1], утвержденные ГОСГОРПРОМНАДЗОРом Украины, которые так же используют параметр коэрцитивной силы для оценки остаточного ресурса

**МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ  
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КРАНОВЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ  
ПО ПАРАМЕТРАМ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ  
И КОЭФФИЦИЕНТА ВАРИАЦИИ ТВЕРДОСТИ**

---

кранов. Однако они обладают рядом существенных недостатков, которые ограничивают возможность их применения к решению поставленных задач:

- При определении поврежденности узла металлоконструкции не учитывается значение напряжений, при которых эксплуатировался данный узел. Хотя известно, (прил. 6 [1]), что для низкого уровня напряжений коэрцитивная сила сначала остается практически неизменной, и лишь на последней стадии эксплуатации резко возрастает, а при высоком уровне напряжений коэрцитивная сила изначально резко возрастает, после чего остается практически неизменной.

- Не предусмотрено никаких способов, позволяющих применять зависимости, полученные для лабораторных образцов, к решению задачи по оценке остаточного ресурса крановых металлоконструкций. Например: образцы испытывались на циклическую прочность при трех уровнях напряжений (прил. 6 [1]) 350МПа, 300МПа, 250МПа и 200МПа, в то время как в узлах крановых металлоконструкций действуют намного меньшие напряжения – 50МПа, 150МПа [2].

- Отсутствуют данные об измерении коэрцитивной силы в процессе накопления усталостных повреждений для стали (09Г2С), как наиболее широко применяемой в краностроении.

В связи с указанными существенными недостатками авторами была проведена серия испытаний на выносливость плоских образцов, изготовленных из крановой марки стали (09Г2С) [3]. По полученным экспериментальным данным была построена аппроксимирующая зависимость поврежденности, накопленной в металле образца, от уровня напряжений ( $\sigma$ ), действующих в этом образце и от коэрцитивной силы ( $H_c$ ). Аппроксимация выполнялась полиномом третьей степени, как таким, что дает наибольшую точность в расчетах:

$$D = -9,42959 \cdot 10^{-9} \cdot \sigma^3 + 0,0226198 \cdot H_c^3 - 3,14719 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^2 \cdot H_c - 0,000109572 \cdot \sigma \cdot H_c^2 + 0,0148082 \cdot \sigma \cdot H_c - 0,000124572 \cdot \sigma^2 - 0,407519 \cdot H_c^2 - 0,0526874 \cdot \sigma + 1,07664 \cdot H_c + 0,258102, \quad (1)$$

$$H_c \geq 3,5; \quad 0 \leq D \leq 1, \quad 150 \text{ МПа} \leq \sigma \leq 245 \text{ МПа},$$

Точность аппроксимации оценивалась по критерию Пирсона и с вероятностью 0,93 составила 0,3 единицы.

Также были определены нормы дефектности материала, для которых с вероятностью 0,9 можно утверждать о его полной поврежденности

$$P(7 < H_c < 8) = 0,9. \quad (2)$$

**МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ  
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КРАНОВЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ  
ПО ПАРАМЕТРАМ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ  
И КОЭФФИЦИЕНТА ВАРИАЦИИ ТВЕРДОСТИ**

Одновременно с измерениями коэрцитивной силы металла образца были произведены замеры твердости по Бринеллю и определена аппроксимирующая зависимость поврежденности от уровня напряжений и коэффициента вариации твердости ( $\gamma_{HB}$ )

$$D = 2,01697 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma^3 + 0,00034189 \cdot \gamma_{HB}^3 + 4,5937 \cdot 10^{-7} \cdot \sigma^2 \cdot \gamma_{HB} - 0,000322643 \cdot \sigma \cdot \gamma_{HB}^2 + 0,00425589 \cdot \sigma \cdot \gamma_{HB} - 0,00122734 \cdot \sigma^2 + 0,067117 \cdot \gamma_{HB}^2 + 0,238269 \cdot \sigma - 1,06248 \cdot \gamma_{HB} - 13,3279, \quad (3)$$

$$\gamma_{HB} \geq 1,8, \quad 0 \leq D \leq 1, \quad 150 \text{ МПа} \leq \sigma \leq 245 \text{ МПа},$$

Точность аппроксимации с вероятностью 0,91 составила 0,2.

Нормы дефектности материала, который полностью поврежден, указаны ниже

$$P(2,25 < \gamma_{HB} < 2,56) = 0,9. \quad (4)$$

По указанным выше зависимостям можно определить степень повреждения, накопленного в элементе образца, при известных значениях уровня напряжений, действующих в этом узле, и величины коэрцитивной силы (либо коэффициента вариации твердости). Для возможности применения полученных зависимостей к элементам крановых металлоконструкций необходимо произвести пересчет напряжений, действующих в узле крановой металлоконструкции, к напряжениям, действующим в образце

$$\sigma^I = \sigma_R^I + \sqrt{0,002 \cdot \sigma_R^I + 0,2 \sqrt{10^{0,005(\sigma_R^I - \sigma_R^K)}} \cdot (\sigma^K - \sigma_R^K)^{0,002 \cdot \sigma_R^K + 0,8}}, \quad (5)$$

где  $\sigma^K$  – напряжения, действующие в опасном элементе металлоконструкции;

$\sigma_R^K$  – предел выносливости опасного узла металлоконструкции крана;

$\sigma^O$  – напряжения, действующие в ступени образца;

$\sigma_R^O$  – предел выносливости образца.

Пересчет производился исходя из условия равенства поврежденностей, накопленных в лабораторном образце, так и в опасном узле реальной металлоконструкции крана с использованием линейной гипотезы накопления повреждений.

Таким образом, авторами предложен метод оценки остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных машин, который состоит из следующих основных этапов:

**МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ  
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КРАНОВЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ  
ПО ПАРАМЕТРАМ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ  
И КОЭФФИЦИЕНТА ВАРИАЦИИ ТВЕРДОСТИ**

---

---

1. Сбор документации, изучение режима работы крана, опрос рабочего персонала, изучение паспорта крана.

2. Определение опасных элементов на основании обследования металлоконструкции грузоподъемной машины с применением магнитного метода коэрцитивной силы.

3. Определение закона изменения напряжений в наиболее опасных узлах крана с помощью расчета либо натурального эксперимента с применением тензометрирования.

4. Предварительное определение остаточного ресурса опасных элементов крановой металлоконструкции по менее точной зависимости (5) и с учетом (1) с целью выделения одного или нескольких наиболее опасных, ограничивающих ресурс всего крана.

5. Окончательное определение остаточного ресурса наиболее опасных элементов конструкции с применением более точной зависимости (3), основанной на параметре коэффициента вариации твердости.

**Выводы.** Предложен метод, который позволяет оценивать остаточный ресурс крановых металлоконструкций грузоподъемных машин с учетом уровня напряжений, действующих в опасных узлах. Предлагаемый метод учитывает необходимость преобразования данных, полученных при испытании лабораторных образцов, для применения их при оценке ресурса узлов крановых металлоконструкций.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Немчук А. О., Стариков М. А. Определение остаточного ресурса металлоконструкции козлового крана // Труды Одесского политехнического университета. – 2008. – № 2. – С. 36-39.
2. Белятинский А. А., Клименко И. С., Стариков М. А. Оценка остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных машин // Вісник інженерної академії України. – 2010. – № 3-4. – С. 196-198.

*Надійшла 11.03.2011*

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Судноремонт» Одеського національного морського університету **В.Д. Євдокимов.**

**ИНТЕРНЕТ-МОНИТОРИНГ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ  
СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

*В статье рассматриваются основные аспекты и вопросы функционирования системы интернет-мониторинга энергетической установки (СЭУ) транспортного судна.*

*У статті розглядаються основні аспекти і питання функціонування системи інтернет-моніторингу енергетичної установки транспортного судна.*

*The article examines the main aspects and the functioning of the Internet monitoring system of marine power plant.*

**Ключевые слова:** интернет-мониторинг, эффективные энергетические показатели.

**Постановка задачи.** Время desktop-приложений, как и время локального решения задач управления технологическими процессами быстро уходит в прошлое. В настоящее время актуально сетевое, корпоративное online-управление и контроль, когда учитываются мнения многих и всем видны результаты совместной деятельности. Эффективность такой стратегии в разы выше за счет быстрых обратных связей и исключения случайного субъективного фактора. Основными энергетическими объектами современного транспортного судна общего назначения являются главные двигатели, вспомогательные дизельгенераторы и котел. От технического состояния этих объектов зависит способность судна выполнять свою главную задачу – перевозить грузы, а также безопасность мореплавания и жизнь экипажа. Текущие расходы на эксплуатацию этих объектов в виде расходов на топливо, масло и ремонт также стоят на первом месте [1]. Поэтому актуальными являются следующие задачи: повышение эффективности работы СЭУ, контроль мощности на всех эксплуатационных режимах, учет потребления топлива и масла, а также точный учет моторесурса в зависимости от степени нагруженности механизмов [2]

$$g_e = f(n, Ne); g_m = f(Ne); t = f(Ne),$$

где  $g_e$ ,  $g_m$  – удельные эффективные расходы топлива и масла;  
 $t$  – время работы механизмов (наработок).

**Целью** настоящей статьи является анализ основных аспектов и решение вопросов функционирования системы интернет-мониторинга энергетической установки транспортного судна.

Исходя из поставленной задачи, сотрудниками лаборатории мониторинга СДВС кафедры «Судовые энергетические установки и техниче-

**ИНТЕРНЕТ-МОНИТОРИНГ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ  
СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

ская эксплуатация» ОНМУ разработана система on-line контроля следующих основных объектов СЭУ: главных двигателей (2-х), вспомогательных двигателей (до 4-х дизельгенераторов) и судового котла ([www.dfm.od.ua](http://www.dfm.od.ua), *гостевые реквизиты: имя: guest, пароль: guest*. Просматривать в *Mozilla Firefox*).

Система базируется на современных технологиях определения эффективных параметров СЭУ в процессе эксплуатации судна. Определение в эксплуатации реальных значений эффективной мощности главных и вспомогательных двигателей позволяет максимально корректно рассчитывать фактический расход топлива/масла, а также контролировать техническое состояние дизелей. Такая информация позволяет с одной стороны производить тщательный контроль расхода ГСМ, а с другой стороны позволяет поддерживать нормальное техническое состояние основных объектов СЭУ силами технического персонала судна.

Известно, что существует техническая проблема определения расхода топлива в эксплуатации с помощью разного рода расходомеров. Практически невозможно объяснить колебания расхода в широких диапазонах, не учитывая внешние условия эксплуатации судна, фактор обрастания корпуса и состояние двигателей. Сложность установки расходомеров объясняется, также тем, что на большинстве дизелей существует обратная отсечная магистраль, а значит нужно устанавливать два(!) дорогостоящих расходомера, работа которых происходит в среде со значительными гидродинамическими пульсациями. Кроме того, существуют неконтролируемые протечки и субъективный человеческий фактор, что в совокупности сводит на нет все усилия по непосредственному контролю расхода топлива в эксплуатации.

Очевидное решение перечисленных проблем заключается в максимально корректной оценке эффективных показателей СЭУ, в первую очередь – мощности и моменте на гребном валу главных двигателей. В этом случае, влияние всех внешних факторов учитываются по эффективной мощности. В конечном итоге, именно удельный эффективный расход топлива  $g_e$  [g/kWt \* h] является паспортной величиной двигателя и может быть принят в качестве независимого экспертного критерия. Изменение  $g_e$  в зависимости от технического состояния двигателей носит предсказуемый характер и может быть с достаточной точностью определено при теплотехнических испытаниях.

Анализ основных типов главных среднеоборотных двигателей судов класса «река-море» (NVD-48, skoda 275, Г-72(70) и др.) позволил сформулировать общую двухпараметрическую зависимость удельного эффективного расхода топлива в зависимости от мощности и частоты вращения вала двигателя

**ИНТЕРНЕТ-МОНИТОРИНГ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ  
СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

---

$$g_e = f(n, N_e);$$

$$ge = k * 20.7 * \exp((n_{nom} - n) / n_{nom}) + A + (B + (C + (D + Fn)n)n)n,$$

где  $n, n_{nom}$  – текущая и номинальная частота вращения КВ двигателя;

$A, B, C, D, E$  – коэффициенты полиномиальной зависимости, определяемые по данным теплотехнических испытаний путем минимизации функционала  $Z$  с помощью процедуры безградиентного поиска Powell'64 [3]

$$Z = \sum \left[ \frac{f_t - f(A, B, C, D, F)}{f_t} \right] \Rightarrow \min;$$

$k$  – коэффициент нагрузки двигателя, определяемый по формуле

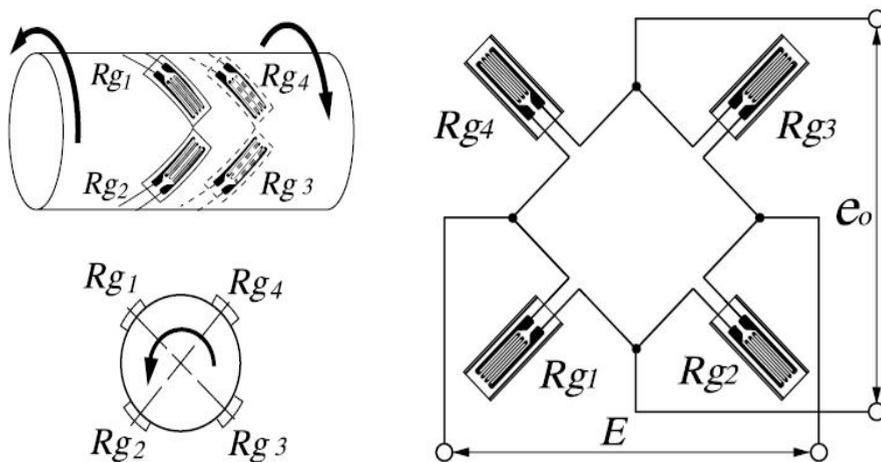
$$k = Ne / k1 * \exp((n_{nom} - n) / n_{nom}) + A + (B + (C + Dn)n)n,$$

где  $k1$  – коэффициент, рассчитываемый с помощью специального устройства, определяющего эффективный момент  $M_e$  на валу двигателя.

Датчиком устройства служит тензометрический мост, построенный на элементной базе KYOWA ELECTRONIC [4]. Принцип работы моста показан на рисунке. Особенностью приведенной на рисунке схемы является повышенная чувствительность, помехозащищенность и термокомпенсация. Элементная база KYOWA позволяет осуществить устойчивое, защищенное соединение тензорезисторов с валом и исключить температурную погрешность подводящего кабеля. В лаборатории кафедры СЭУиТЭ построен специальный стенд для тарировки и тестирования тензометрических мостов. Испытания показали высокую чувствительность такой схемы и линейность выходного сигнала.

Система, предназначенная для определения параметров основных объектов СЭУ и привязанная к ним сенсорами, рассредоточена по всему машинному отделению судна. Устаревшие, дорогостоящие и слабо помехозащищенные гальванические связи заменены в системе DFM на современную беспроводную Mesh-сеть, построенную на модулях XBee Series 2 [5]. Благодаря встроенному в модули стеку, все операции по формированию сети осуществляются автоматически, без участия внешнего микроконтроллера. Модули устанавливаются в монтируемых на плате одnorядных держателях Samtec и не требуют пайки. Это является удобной опцией в связи с необходимостью модифицировать управляющую программу, при изменении конфигурации системы, или обновлять стек. Модули могут работать самостоятельно благодаря наличию у них периферийных узлов – портов ввода-вывода и АЦП. На практике (в условиях МО) была подтверждена заявленная характеристика модулей – устойчивое сетевое соединение в радиусе 40 метров вне зоны прямой видимости, что является достаточным для использования в судовых условиях.

**ИНТЕРНЕТ-МОНИТОРИНГ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ  
СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**



*Рис. Тензометрическая мостовая схема для определения скручивающего момента на валу*

Система DFM производит отображение маршрута следования судна по карте Google maps. В связи с этим актуальной является задача корректного выбора частоты дискретизации данных (опроса позиции по GPS/ГЛОНАСС и всех датчиков в машинном отделении). Если выбрать большой интервал времени между опросами, может произойти эффект «плавания судна по берегам», в этом случае корректность расчета расхода топлива и мощности будет весьма сомнительной. Эта проблема особенно актуальна для речных судов. В DFM дискретность получения данных заведомо меньше постоянных времени как самого судна, так и контролируемых объектов СЭУ. Благодаря этому в DFM поддерживается высокое качество отображения записанного маршрута и минимизируется погрешность в расчете мощности и потребляемого ГСМ.

Система является легко расширяемой. В ее состав могут быть включены дополнительные датчики, позволяющие производить мониторинг других объектов СЭУ, например, можно контролировать шаг винта ВРШ или работу мощных вспомогательных механизмов.

**Выводы.** По результатам работы системы можно осуществлять:

- анализ фактической мощности и потребления топлива и масла СЭУ;
- планирование ремонтов и учет расхода запасных частей, основанный на определении фактического времени наработки объектов СЭУ, причем учитывать не только время, но и степень нагруженности механизмов;
- оптимальное управление режимами работы СЭУ для конкретной задачи и условий эксплуатации судна (варьировать нагрузочные режимы

**ИНТЕРНЕТ-МОНИТОРИНГ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ  
СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

---

---

СЭУ в зависимости от выбранных критериев оптимизации, получать результат и оперативно реагировать на текущую ситуацию);

Доступ к информации, передаваемой с судна по одному из каналов связи (GPRS, INMARSAT или спутниковая связь), организован через сайт [www.dfm.od.ua](http://www.dfm.od.ua). Службе управления достаточно иметь выход в интернет и параметры авторизации, чтобы из любой точки мира круглосуточно получать информацию по своим судам. Беспроводные технологии обмена данными не требуют прокладки кабельных трасс, минимизируют время установки и позволяют снизить стоимость всей установки, наряду с повышением ее надежности и помехозащищенности.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Семенов В.С. *Современные проблемы теории судовых дизелей (рабочий процесс и теплопередача): Тексты лекций.* – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1991. – 112 с.
2. Фомин Ю.Я. и др. *Судовые двигатели внутреннего сгорания.* – Л.: Судостроение, 1989. – 344 с.
3. Химмельблау Д. *Прикладное нелинейное программирование.* – М.: Мир, 1975. – 534 с.
4. *TP bridge manual [Электронный ресурс].* – Режим доступа: <http://www.kyowa.ru>
5. *XVee manual [Электронный ресурс].* – Режим доступа: <http://www.digi.com>

Надійшла 20.05.2011

**Рецензент** – кандидат технічних наук, професор кафедри «Судно-ві технічні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету **С.Я. Соломатін.**

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

---

*Результаты исследований термодинамических связей совместно с технико-экономическим анализом послужили основой для разработки эксергетической технико-экономической модели абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины. Модель может быть использована при разработке и модернизации автоматизированных абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин.*

*Результати досліджень термодинамічних зв'язків спільно з техніко-економічним аналізом послужили основою для розробки эксергетичного техніко-економічної моделі абсорбційної бромістолітійової холодильної машини. Модель може бути використана при розробці і модернізації автоматизованих абсорбційних бромістолітійових холодильних машин.*

*The results of investigations of the thermodynamic relations together with the feasibility study provided the basis for the development of exergy techno-economic model of the lithium bromide absorption chiller. The model can be used in the design and modernization of the automated absorption bromide refrigerating machines.*

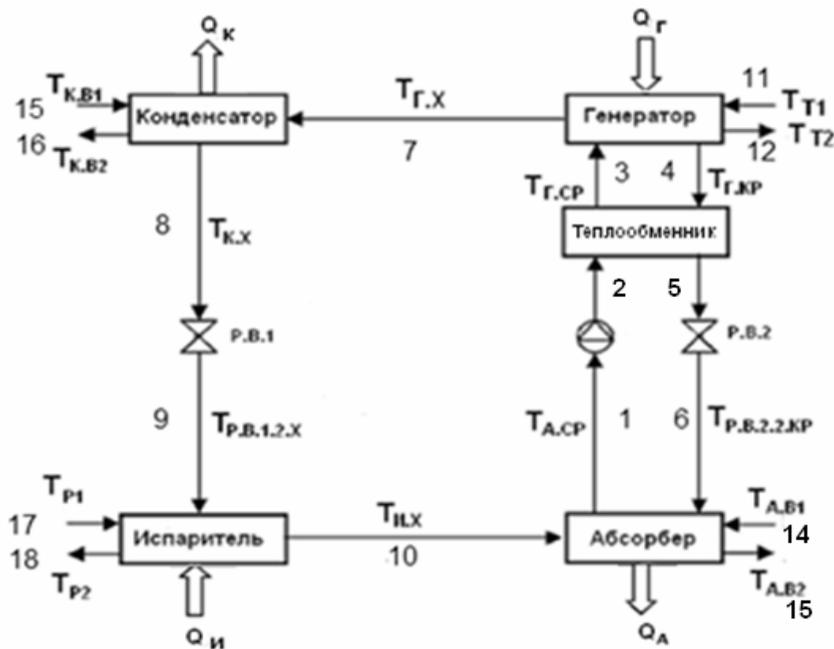
**Ключевые слова:** абсорбционная холодильная машина, эксергия, технико-экономический анализ, система автоматического управления.

Тенденции при проектировании теплоиспользующих абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин (АБХМ) имеют два основных направления. С одной стороны это повышение энергоэффективности агрегатов и АБХМ в целом, а с другой стороны использование разработчиками систем автоматизированного управления (САУ) холодильными машинами технических решений на основе современных электронных компонентов. Первое направление реализуется расчетами и подбором оборудования на стадиях проектирования, модернизации и эксплуатации АБХМ с использованием результатов развития компьютерных технологий. В этих целях фирмами производителями создаются программные продукты, позволяющие в процессе расчета и подбора оборудования автоматизировать АБХМ. Что же касается оценки эффективности работы АБХМ, то как известно специалисты, осуществляя технико-экономический анализ, часто ограничиваются только определением массогабаритных и экономических характеристик машин. Однако для получения объективной оценки функционирования АБХМ таких результатов анализа недостаточно. Для полной оценки технико-экономической эффективности при сравнении, выборе, совершенствовании и автоматизации АБХМ необходимо проведение дополнительного анализа, результатом которого должно стать определение термодинамической эффективности

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБИЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

агрегатов и машины в целом. Использование эксергетического метода в сочетании с технико-экономическим анализом [1-5] позволяет оценить совершенство, выбрать оптимизируемые параметры, оказывающие наибольшее влияние на термодинамическую эффективность АБХМ.

В целях разработки эксергетической технико-экономической модели было проведено исследование АБХМ с одноступенчатой генерацией пара рабочего вещества и совмещенным теплопереносом в абсорбере (рис.1). При проведении исследований АБХМ был принят цикл при следующих допущениях: отсутствуют потери от неполноты насыщения и выпаривания раствора при абсорбции пара и кипении раствора в аппаратах; гидравлические сопротивления, возникающие при прохождении пара из испарителя в абсорбер и из генератора в конденсатор, отсутствуют; высшая температура раствора в конце его кипения в генераторе равна температуре греющего источника; низшая температура абсорбции равна температуре конденсации пара, которая в свою очередь принята равной температуре охлаждающей среды; температура кипения воды в испарителе равна температуре охлаждаемой среды; состояние пара, поступающего из генератора в конденсатор, определяется для средней концентрации и давления раствора при кипении.

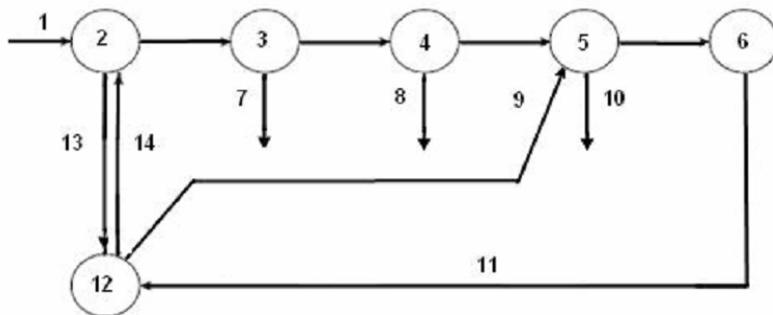


*Рис.1. Структурная схема АБХМ  
с одноступенчатой генерацией пара рабочего вещества*

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБИЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

При проведении исследований использовались технические характеристики АБХМ-600П ООО "ОКБ ТЕПЛОСИБМАШ" с паровым обогревом с одноступенчатой регенерацией раствора. Генератор и конденсатор АБХМ-600П, а также абсорбер и испаритель объединены попарно в блоки. Основным показателем изменения тепловой нагрузки АБХМ является температура охлажденной воды (рассола –  $T_{p2}$ ) на выходе из испарителя. Холодильным агентом является вода. Поглотителем бромистый литий (LiBr). Для охлаждения в качестве источника энергии используется греющий водяной пар низкого давления (0,2-0,7 атм.). Номинальные параметры и характеристики АБХМ-600П: холодильная мощность – 685 кВт; расход пара – 1610 кг/ч; расход охлаждаемой воды – 118 м<sup>3</sup>/ч; расход охлаждающей воды – 176 м<sup>3</sup>/ч; скорость циркуляции потока 10 кг/с, температуры охлаждаемой воды (рассола) на входе 12 °С, на выходе 7 °С; температуры охлаждающей воды на входе 28 °С, на выходе 36 °С.

При анализе изменений основного потока эксергии учитывались ее потери в агрегатах, потери при передаче эксергии от одного агрегата к другому, а также эксплуатационные затраты. Взаимодействие агрегатов исследуемой системы (представленной в виде эквивалентного графа) осуществлялось посредством связей, показанных на рис.2



*Рис.2. Эквивалентный граф одноступенчатой АБХМ (1, 2, 14, 3, 4, 5, 6, 11, 12 – подвод эксергии к АБХМ, генератору, конденсатору, испарителю, абсорберу, насосу, теплообменнику; 7, 8, 10, 13 – отвод эксергии от конденсатора к охлаждающей воде, от испарителя к рассолу, от абсорбера к охлаждающей воде, от генератора к крепкому раствору)*

В соответствии со схемой рис.2 технологический процесс в АБХМ был представлен как последовательное соединение элементарных процессов. В качестве уравнений связи использовались уравнения потоков эксергии, передаваемой от одного агрегата к другому. Для каждой связи на рис.2 определялись эксергетические зависимости (характеристики), учи-

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

тывающие зависимости выходных и входных параметров соответствующих узлов машины. Узлы описываются эксергетическими технико-экономическими моделями. В рамках системного подхода эксергетическая технико-экономическая модель представляет собой совокупность моделей подсистем, связывающих входные эксергетические, расходные и другие характеристики агрегатов АБХМ с их выходными значениями с учетом влияния внешних воздействий. При разработке модели термодинамический анализ проводился с использованием статического уровня решения задачи, при котором система рассматривалась на каждом этапе как находящаяся в стационарном состоянии с постоянными параметрами. Полученное математическое описание эксергетической технико-экономической модели АБХМ представляет собой зависимости следующего вида:

$$\begin{aligned}
 E_{\Gamma} &= E_{\Gamma}(E_{\Gamma}, m_{\Gamma}, m_X, m_{KP}, m_{CP}, T_{OC}, T_{\Gamma.KP}, T_{T.CP}, T_{\Gamma.X}, T_{T1}, T_{T2}); \\
 E_{D,\Gamma} &= E_{D,\Gamma}(m_{\Gamma}, m_X, m_{K.P}, m_{C.P}, T_{OC}, T_{T1}, T_{T2}, T_{\Gamma.X}, T_{\Gamma.K.P}, T_{T.C.P}, T_{\Gamma}); \\
 \Pi_{\Gamma} &= \Pi_{\Gamma}(E_{\Gamma}, m_{\Gamma}, m_X, m_{KP}, m_{CP}, T_{OC}, T_{\Gamma.KP}, T_{T.CP}, T_{\Gamma.X}, T_{T1}, T_{T2}, \Pi_{E_{\Gamma}}, \tau_e); \\
 E_K &= E_K(E_{\Gamma}, m_X, m_B, T_{OC}, T_{\Gamma.X}, T_{K.X}, T_K, T_{K.B1}, T_{K.B2}); \\
 E_{D,K} &= E_{D,K}(m_X, m_B, T_{OC}, T_{K.X}, T_{\Gamma.X}, T_{K.B.1}, T_{K.B.2}, T_K); \\
 \Pi_K &= \Pi_K(E_{\Gamma}, m_X, m_B, T_{OC}, T_{\Gamma.X}, T_{K.X}, T_K, T_{K.B1}, T_{K.B2}, \Pi_{E_K}, \tau_e); \\
 E_{P,B1} &= E_{P,B1}(E_K, m_X, T_{OC}, T_{P.B.1.1.X}, T_{P.B.1.2.X}); \\
 E_{D,P.B1} &= E_{D,P.B1}(m_X, T_{OC}, T_{P.B.1.1.X}, T_{P.B.1.2.X}); \\
 \Pi_{P,B1} &= \Pi_{P,B1}(E_K, m_X, T_{OC}, T_{P.B.1.1.X}, T_{P.B.1.2.X}, \Pi_{E_{P.B1.X}}, \tau_e); \\
 E_{II} &= E_{II}(E_{P,B1}, m_X, m_P, T_{OC}, T_{II.X}, T_{P.B.1.2.X}, T_{II}, T_{P1}, T_{P2}); \\
 E_{D,II} &= E_{D,II}(m_X, m_P, T_{OC}, T_{II.X}, T_{P.B.1.2.X}, T_{P1}, T_{P2}, T_{II}); \quad (1) \\
 \Pi_{II} &= \Pi_{II}(E_{P,B1}, m_X, m_P, T_{OC}, T_{II.X}, T_{P.B.1.2.X}, T_{II}, T_{P1}, T_{P2}, \Pi_{E_{II.X}}, \tau_e); \\
 E_A &= E_A(E_{II}, m_X, m_{K.P}, m_{C.P}, m_B, T_{OC}, T_{II.X}, T_{AC.P}, T_{P.B.2.2.K.P}, T_A, T_{B1}, T_{B2}); \\
 E_{D,A} &= E_{D,A}(m_{K.P}, m_{C.P}, m_X, m_{AB}, T_{OC}, T_{AC.P}, T_{II}, T_{AB1}, T_{AB2}, T_{P.B.2.2}, T_A); \\
 \Pi_A &= \Pi_A(E_{II}, m_X, m_{K.P}, m_{C.P}, m_B, T_{OC}, T_{II.X}, T_{AC.P}, T_{P.B.2.2.K.P}, T_A, T_{B1}, T_{B2}, \Pi_{E_A}, \tau_e); \\
 E_T &= E_T(E_A, m_{K.P}, m_{C.P}, T_{OC}, T_{T.1.C.P}, T_{T.2.C.P}, T_{T.1.K.P}, T_{T.2.K.P}); \\
 E_{D,T} &= E_{D,T}(m_{K.P}, m_{C.P}, T_{OC}, T_{T.1.K.P}, T_{T.2.K.P}, T_{T.1.C.P}, T_{T.2.C.P}); \\
 \Pi_T &= \Pi_T(E_A, m_{K.P}, m_{C.P}, T_{OC}, T_{T.1.C.P}, T_{T.2.C.P}, T_{T.1.K.P}, T_{T.2.K.P}, \Pi_{E_{T.2.C.P}}, \tau_e); \\
 E_{P,B2} &= E_{P,B2}(E_T, m_{KP}, T_{OC}, T_{P.B.2.1.K.P}, T_{P.B.2.2.K.P}); \\
 E_{D,P.B2} &= E_{D,P.B2}(m_{KP}, T_{OC}, T_{P.B.2.1.K.P}, T_{P.B.2.2.K.P}); \\
 \Pi_{P,B2} &= \Pi_{P,B2}(E_T, m_{KP}, T_{OC}, T_{P.B.2.1.K.P}, T_{P.B.2.2.K.P}, \Pi_{E_{P.B.2.1}}, \tau_e),
 \end{aligned}$$

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

где  $E_G, E_K, E_{II}, E_{P.B1}, E_A, E_T, E_{P.B2}$  – эксергия, передаваемая генератором, конденсатором и испарителем хладагенту; эксергия хладагента на выходе регулирующего вентиля P.B1 (рис.1); эксергия, передаваемая слабому раствору абсорбером; эксергия, передаваемая теплообменным аппаратом; эксергия крепкого раствора на выходе регулирующего вентиля P.B2 (рис.1);

$E_{D.G}, E_{D.K}, E_{D.P.B1}, E_{D.II}, E_{D.A}, E_{D.T}, E_{D.P.B2}$  – эксергетические потери в агрегатах АБХМ;

$П_G, П_K, П_{P.B1}, П_{II}, П_A, П_T, П_{P.B2}$  – приведенные затраты при эксплуатации агрегатов АБХМ;

$m_X, m_T, m_{C.P}, m_{K.P}, m_B, m_P$  – массовые расходы хладагента, теплоносителя, слабого и крепкого растворов, охлаждающей воды, рассола;

$T_G, T_{TI}, T_{T2}, T_{G.X}, T_{T.C.P}, T_{G.K.P}$  – температуры генератора, теплоносителя на входе и выходе генератора, хладагента на выходе генератора, слабого и крепкого растворов на входе и выходе генератора;

$T_K, T_{K.B1}, T_{K.B2}, T_{K.X}$  – температуры конденсатора, охлаждающей воды на входе и выходе конденсатора, хладагента на выходе конденсатора;

$T_{II}, T_{PI}, T_{P2}, T_{II.X}, T_{P.B1.2.X}$  – температуры испарителя, рассола на входе и выходе испарителя, хладагента на выходе и на входе в испаритель;

$T_A, T_{A.C.P}, T_{A.B1}, T_{A.B2}, T_{P.B2.2.K.P}$  – температуры абсорбера, слабого раствора на выходе абсорбера, охлаждающей воды на входе и выходе абсорбера, крепкого раствора на входе в абсорбер;

$\tau_e$  – время работы АБХМ в течение года

При разработке модели учтено, что массовый баланс компонентов в АБХМ с учетом обозначений на рис.1 определяется системой уравнений

$$\begin{aligned}
 m_{C.P} &= m_1 = m_2 = m_3; \\
 m_{K.P} &= m_4 = m_5 = m_6; \\
 m_X &= m_7 = m_7 = m_9 = m_{10}; \\
 m_T &= m_{11} = m_{12}; \\
 m_B &= m_{13} = m_{14} = m_{15} = m_{16}; \\
 m_P &= m_{17} = m_{18}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Массовый расход хладагента (2) в АБХМ определяется по формуле

$$m_X = \frac{Q_0}{q_0},$$

где  $Q_0$  – полная тепловая нагрузка на АБХМ;

$q_0$  – удельная тепловая нагрузка на АБХМ.

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБИЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

При разработке модели учтено, что энергетический баланс в АБХМ определяется совокупностью уравнений вида

$$\begin{aligned} Q_{\Gamma} &= m_{K.P.} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{K.P.} + k_3 \cdot x_{K.P.}^2) \cdot T_{\Gamma.KP} - \\ &\quad - m_{C.P.} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{C.P.} + k_3 \cdot x_{C.P.}^2) \cdot T_{T.CP} + m_X \cdot c_X \cdot T_{\Gamma.X} \\ Q_K &= m_X \cdot c_X \cdot (T_{\Gamma.X} - T_{K.X}); \\ Q_{II} &= m_X \cdot c_X \cdot (T_{II.X} - T_{P.B.1.2.X}); \\ Q_A &= m_X \cdot c_X \cdot T_{II.X} + m_{K.P.} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{K.P.} + k_3 \cdot x_{K.P.}^2) \cdot T_{P.B.2.2.KP} - \\ &\quad - m_{C.P.} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{C.P.} + k_3 \cdot x_{C.P.}^2) \cdot T_{A.CP} \end{aligned}$$

где  $Q_{\Gamma}$ ,  $Q_K$ ,  $Q_{II}$ ,  $Q_A$  – теплопритоки в генератор, из конденсатора, в испаритель, из абсорбера;

$c_X$  – удельная теплоемкость хладагента;

$k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  – расчетные коэффициенты.

Общая формула для определения удельной теплоемкости раствора от концентрации LiBr имеет вид

$$c = 1.01 - 1.23 \cdot x + 0.48 \cdot x^2.$$

Концентрация ( $x$  – LiBr раствора) в разных точках схемы определяется

$$\begin{aligned} x_{A.CP} &= \frac{49.04 + 1.125 \cdot T_A - T_{II}}{134.65 + 0.47 \cdot T_A}, \\ x_{\Gamma.KP} &= \frac{49.04 + 1.125 \cdot T_{\Gamma} - T_K}{134.65 + 0.47 \cdot T_{\Gamma}}. \end{aligned}$$

Входящие в эксергетическую технико-экономическую модель (1) потоки эксергии определяются с учетом рекомендаций [1] по формулам

$$\begin{aligned} E_{\Gamma.X} &= E_{T.CP} - Q_{\Gamma} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{\Gamma}}\right) + m_T \cdot c_T \cdot (T_{T1} - T_{T2}) - m_X \cdot c_X \cdot T_0 \cdot \lg \frac{T_{\Gamma.X}}{T_0} + \\ &\quad + m_{C.P.} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{C.P.} + k_3 \cdot x_{C.P.}^2) \cdot T_0 \cdot \lg \frac{T_{T.CP}}{T_0} - \\ &\quad - m_{K.P.} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{K.P.} + k_3 \cdot x_{K.P.}^2) \cdot T_0 \cdot \left(\frac{T_{\Gamma.KP}}{T_0} - 1\right); \\ E_{K.X} &= E_{\Gamma.X} + Q_K \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_K}\right) - m_X \cdot c_X \cdot T_0 \cdot \left(\lg \frac{T_{K.X}}{T_0} - \lg \frac{T_{\Gamma.X}}{T_0}\right) - \\ &\quad - m_B \cdot c_B \cdot (T_{K.B2} - T_{K.B1}) \end{aligned}$$

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

$$\begin{aligned}
 E_{P.B1.X} &= E_{K.X} - m_X \cdot c_X \cdot T_0 \cdot \left( \lg \frac{T_{P.B1.2X}}{T_0} - \lg \frac{T_{P.B1.1X}}{T_0} \right); \\
 E_{H.X} &= E_{P.B1.X} - Q_H \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_H} \right) - m_X \cdot c_X \cdot T_0 \cdot \left( \lg \frac{T_{H.X}}{T_0} - \lg \frac{T_{P.B.1.2.X}}{T_0} \right) + \\
 &+ m_P \cdot c_P \cdot (T_{P1} - T_{P2}) \\
 E_{A.CP} &= E_{H.X} + Q_A \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_A} \right) + m_X \cdot c_X \cdot T_0 \cdot \lg \frac{T_{H.X}}{T_0} - \\
 &- m_{C.P} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{CP} + k_3 \cdot x_{CP}^2) \cdot T_0 \cdot \lg \frac{T_{A.CP}}{T_0} + \\
 &+ m_{K.P} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{KP} + k_3 \cdot x_{KP}^2) \cdot T_0 \cdot \left( \frac{T_{P.B.2.2.K.P}}{T_0} - 1 \right) + \\
 &+ m_B \cdot c_B \cdot T_0 \cdot (T_{B1} - T_{B2}); \\
 E_{T.2.CP} &= E_{A.CP} - E_{T.2.KP} - \\
 &- m_{C.P} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{CP} + k_3 \cdot x_{CP}^2) \cdot T_0 \cdot \left( \lg \frac{T_{T.2.CP}}{T_0} - \lg \frac{T_{T.1.CP}}{T_0} \right) + \\
 &+ m_{K.P} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{KP} + k_3 \cdot x_{KP}^2) \cdot T_0 \cdot \left( \frac{T_{T.1.KP}}{T_0} - 1 - \lg \frac{T_{T.2.KP}}{T_0} \right); \\
 E_{P.21.KP} &= E_{T.2.KP} - \\
 &- m_{K.P} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{KP} + k_3 \cdot x_{KP}^2) \cdot T_0 \cdot \lg \left( \frac{T_{P.B.2.2.KP}}{T_0} - \lg \frac{T_{P.B.2.1.KP}}{T_0} \right)
 \end{aligned}$$

Эксергетические потери, входящие в (1) определяются по формулам

$$\begin{aligned}
 E_{D.\Gamma} &= m_T \cdot c_T \cdot T_0 \cdot \left( \lg \frac{T_{T2}}{T_0} - \lg \frac{T_{T1}}{T_0} \right) + m_X \cdot c_X \cdot T_0 \cdot \lg \frac{T_{\Gamma.X}}{T_0} - \\
 &- m_{C.P} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{CP} + k_3 \cdot x_{CP}^2) \times \\
 &\times T_0 \cdot \lg \frac{T_{T.CP}}{T_0} + m_{K.P} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{KP} + k_3 \cdot x_{KP}^2) \cdot T_0 \cdot \lg \frac{T_{\Gamma.KP}}{T_0} - \frac{T_0}{T_{\Gamma}} \cdot Q_{\Gamma}; \\
 E_{D.K} &= m_X \cdot c_X \cdot T_0 \cdot \left( \lg \frac{T_{K.X}}{T_0} - \lg \frac{T_{\Gamma.X}}{T_0} \right) + \\
 &+ m_B \cdot c_B \cdot T_0 \cdot \left( \lg \frac{T_{K.B2}}{T_0} - \lg \frac{T_{K.B1}}{T_0} \right) + \frac{T_0}{T_K} \cdot Q_K
 \end{aligned}$$

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБИЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

$$\begin{aligned}
 E_{D.PB1} &= m_X \cdot c_X \cdot T_0 \cdot \left( \lg \frac{T_{P.B.1.2.X}}{T_0} - \lg \frac{T_{P.B.1.1.X}}{T_0} \right); \\
 E_{DI} &= m_X \cdot c_X \cdot T_0 \cdot \left( \lg \frac{T_{II.X}}{T_0} - \lg \frac{T_{P.B.1.2.X}}{T_0} \right) + \\
 &+ m_P \cdot c_P \cdot T_0 \cdot \left( \lg \frac{T_{P2}}{T_0} - \lg \frac{T_{P1}}{T_0} \right) - \frac{T_0}{T_{II}} \cdot Q_{II}; \\
 E_{D.A} &= m_{CP} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{CP} + k_3 \cdot x_{CP}^2) \cdot T_0 \cdot \lg \frac{T_{ACP}}{T_0} - \\
 &- m_X \cdot c_X \cdot T_0 \cdot \lg \frac{T_{II}}{T_0} + m_{AB} \cdot c_{AB} \cdot T_0 \times \\
 &\times \left( \lg \frac{T_{AB2}}{T_0} - \lg \frac{T_{AB1}}{T_0} \right) - \\
 &- m_{KP} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{KP} + k_3 \cdot x_{KP}^2) \cdot T_0 \cdot \lg \frac{T_{P.B.2.2}}{T_0} + \frac{T_0}{T_A} \cdot Q_A; \\
 E_{D.T} &= m_{CP} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{CP} + k_3 \cdot x_{CP}^2) \cdot T_0 \cdot \left( \lg \frac{T_{T.2.CP}}{T_0} - \lg \frac{T_{T.1.CP}}{T_0} \right) + \\
 &+ m_{KP} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{KP} + k_3 \cdot x_{KP}^2) \cdot T_0 \cdot \left( \lg \frac{T_{T.2.KP}}{T_0} - \lg \frac{T_{T.1.KP}}{T_0} \right); \\
 E_{D.PB.2} &= m_{KP} \cdot (k_1 - k_2 \cdot x_{KP} + k_3 \cdot x_{KP}^2) \cdot T_0 \cdot \lg \left( \frac{T_{P.B.2.2.KP}}{T_0} - \lg \frac{T_{P.B.2.1.KP}}{T_0} \right).
 \end{aligned}$$

Уравнения эксергетической технико-экономической модели (1) решаются с использованием методов решения нелинейных систем, математические основы которых хорошо отработаны, а их компьютерная реализация имеется в стандартных пакетах математических программ.

Результаты расчётов эксергетических потоков при функционировании агрегатов АБХМ приведены в табл. 1.

Годовые суммарные приведенные затраты с использованием эксергетической технико-экономической модели АБХМ (1) определяются по формуле

$$\Pi_{II} = N_K \cdot \Sigma K + M \cdot \Sigma K + p_{зам} \cdot \sum_{i=1}^n E_i \cdot \tau_e + S_0,$$

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

Таблица 1

*Результаты расчетов эксергетических потоков в АБХМ*

Агрегат АБХМ	Параметры теплоносителя, хладагента, рассола, слабого и крепкого растворов			Эксергия, кВт
	t, °C	m, кг/с	W, кВт	
Генератор	T <sub>T</sub> = 112-115	0,28-0,447	-	367,11
Конденсатор	T <sub>X</sub> = 31,5-33,5	8,0-10,0	-	41,04
Испаритель	T <sub>P</sub> = 11-12	0,005-0,009	-	8,30
Насос слабого раствора	T <sub>CP</sub> = 36	7,0-10,0	0,07	0,07
Абсорбер	T <sub>KP</sub> = 41,5-45,6	1,37-1,75	-	79,88
Теплообменник	T <sub>CP</sub> = 51-55	9,36-11,64	-	11,32

где  $N_k$  – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;  
 $\Sigma K$  – суммарные капиталовложения;

$M$  – коэффициент, учитывающий отчисления на амортизацию и текущий ремонт;

$p_{зам}$  – средневзвешенные замыкающие затраты на единицу эксергии;

$\sum_{i=1}^n E_i$  – суммарное значение выработанной эксергии в течение года;

$S_0$  – затраты на оборудование, ремонт, накладные расходы.

Существенно важным при термодинамическом анализе АБХМ является учёт эксергетического КПД как всей машины, так и комплекствующих ее агрегатов. Наличие эксергетической технико-экономической модели АБХМ позволяет определить безразмерный показатель эксергетического анализа –  $\eta_e$  (эксергетический КПД АБХМ) по формуле

$$\eta_{АБХМ} = 1 - \frac{\sum E_{D_i}}{\sum E_i}, \quad (3)$$

где  $\sum E_i$  – сумма эксергетических потоков, подводимых к агрегатам АБХМ;

$\sum E_{D_i}$  – сумма потерь эксергии в агрегатах АБХМ.

Эксергетический КПД любого агрегата АБХМ определяется из формулы (3) в соответствии с моделью (1) с учетом исходных параметров для расчетов:  $T_0 = 298,15$  К;  $T_{11} = 373,15$  К;  $T_{17} = 289,15$  К;  $T_{18} = 283,15$  К.

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБИЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

Результаты расчетов эксергетических КПД агрегатов АБХМ, полученные с использованием разработанной математической модели приведены в табл.2.

Таблица 2

Эксергетические КПД агрегатов АБХМ

Агрегат АБХМ	$\eta_e$
Генератор	0,61
Конденсатор	0,80
Испаритель	0,91
Абсорбер	0,75
Теплообменник	0,98

На основе использования эксергетической технико-экономической модели были рассчитаны эксергетические потоки, потери эксергии, эксергетические КПД, приведенные затраты для каждого агрегата АБХМ. В качестве примера на рис. 3 представлены результаты расчетов испарителя АБХМ.

Причиной эксергетических потерь в АБХМ являются: необратимый теплообмен между источником низкого потенциала и рабочим агентом в испарителе; необратимый теплообмен между рабочим агентом и окружающей средой повышенного потенциала в конденсаторе.

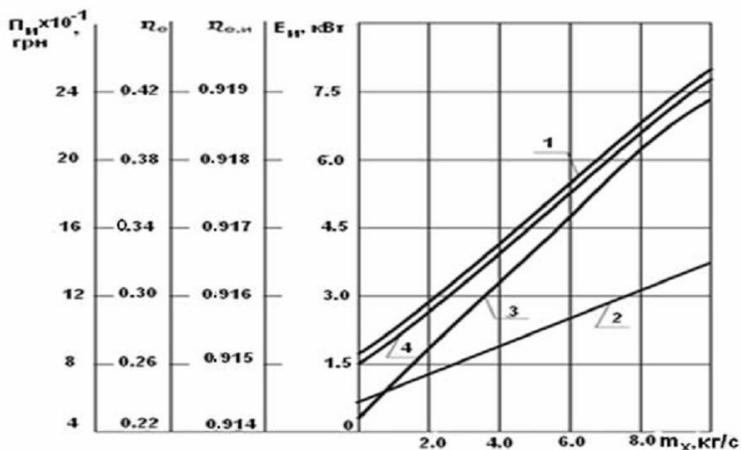


Рис.3. Кривые зависимости изменений:

1 – эксергетического потока  $E_{II}$ ; 2 – эксергетического КПД  $\eta_{e,II}$ ;

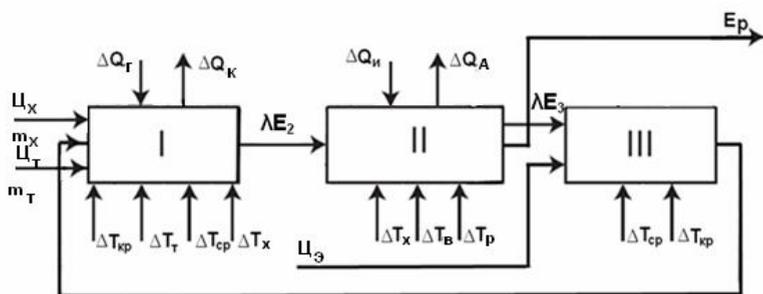
3 – эксергетического КПД АБХМ  $\eta_e$ ;

4 – приведенных затрат на испаритель  $\Pi_{II}$ )

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

Использование разработанной эксергетической технико-экономической модели, а также учёт эксергетического КПД как всей машины, так и комплектующих ее агрегатов позволили осуществить комплексную оптимизацию режима работы АБХМ. При этом применялся термоэкономический подход, использующий эксергию в качестве основного носителя информации о состоянии оптимизируемого объекта. Методика, разработанная на основе такого подхода, позволяет выявить в технологической схеме АБХМ слабые звенья, совершенствование которых приводит к дальнейшему повышению эффективности всей машины в целом. Для предлагаемой методики оптимизации выбирается целевая функция, оптимизирующие переменные и метод оптимизации. Для определения параметров состояния рабочих сред, для расчета термодинамического цикла, а также аппроксимационные выражения для определения стоимости отдельных элементов АБХМ используются математические зависимости (1). При решении оптимизационной задачи применена структурная термоэкономическая модель АБХМ, условно состоящая из последовательно соединенных зон (рис.4).

В каждой зоне группировались агрегаты, режим работы которых определялся общими оптимизирующими переменными. В качестве уравнений связи использовались уравнения потоков эксергии, передаваемой из одной зоны в другую. К зоне I подводится теплоноситель с массовым расходом  $m_T$ , ценой  $C_T$  и отводится хладагент с массовым расходом  $m_X$ , ценой  $C_X$ . К зоне III подводится электрическая энергия с тарифом  $C_E$  для привода электродвигателя насоса.



*Рис. 4. Структурная схема термоэкономической модели АБХМ:  
зона I – генератор, конденсатор; зона II – испаритель, абсорбер;  
зона III – теплообменник, насос*

В каждой зоне группировались агрегаты, режим работы которых определялся общими оптимизирующими переменными. В качестве уравнений связи использовались уравнения потоков эксергии, передаваемой из одной зоны в другую. К зоне I подводится теплоноситель с массовым расходом  $m_T$ , ценой  $C_T$  и отводится хладагент с массовым расходом  $m_X$ ,

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

---

ценой  $C_X$ . К зоне III подводится электрическая энергия с тарифом  $C_{\Sigma}$  для привода электродвигателя насоса.

При выборе целевой функции для решения задачи эксергетической технико-экономической оптимизации параметров комплекса учитывалась взаимосвязь оптимизируемых переменных, а также использовались ограничения-неравенства (линейные) вида

$$\begin{aligned} m_{T,\min} &\leq m_T \leq m_{T,\max}; \quad m_{X,\min} \leq m_X \leq m_{X,\max}; \\ m_{B,\min} &\leq m_B \leq m_{B,\max}; \\ m_{P,\min} &\leq m_P \leq m_{P,\max}; \quad m_{C.P,\min} \leq m_{C.P} \leq m_{C.P,\max}; \\ m_{K.P,\min} &\leq m_{K.P} \leq m_{K.P,\max}; \\ T_{0,\min} &\leq T_0 \leq T_{0,\max}; \quad T_{K,\min} \leq T_K \leq T_{K,\max}; \\ T_{T,\min} &\leq T_T \leq T_{T,\max}; \quad T_{X,\min} \leq T_X \leq T_{X,\max}. \end{aligned}$$

Зависимости величин подводимых к зоне от потока эксергии, выходящего из соответствующей зоны, и действующих на эту зону оптимизируемых переменных с учетом [1] могут быть записаны в виде следующих уравнений:

для зоны I:

$$\begin{aligned} z_{11} &= Z_{11}(E_2, \Delta T_T, \Delta T_X, \Delta T_{K.P}, \Delta T_{C.P}); \\ z_{12} &= Z_{12}(E_2, \Delta T_T, \Delta T_X, \Delta T_{K.P}, \Delta T_{C.P}); \\ m_T &= G_T(E_2, \Delta T_T, \Delta T_X, \Delta T_{K.P}, \Delta T_{C.P}); \\ m_X &= G_X(E_2, \Delta T_T, \Delta T_X, \Delta T_{K.P}, \Delta T_{C.P}), \end{aligned}$$

для зоны II:

$$\begin{aligned} z_{21} &= Z_{21}(E_3, \Delta T_B, \Delta T_X, \Delta T_P); \\ z_{22} &= Z_{22}(E_3, \Delta T_B, \Delta T_X, \Delta T_P); \\ e_2 &= E_2(E_3, \Delta T_B, \Delta T_X, \Delta T_P), \end{aligned}$$

для зоны III:

$$\begin{aligned} z_{31} &= Z_{31}(E_{K.P}, E_{C.P}, \Delta T_{K.P}, \Delta T_{C.P}); \\ z_{32} &= Z_{32}(E_{K.P}, E_{C.P}, \Delta T_{K.P}, \Delta T_{C.P}); \\ e_3 &= E_3(E_{K.P}, E_{C.P}, \Delta T_{K.P}, \Delta T_{C.P}); \\ e_{32} &= E_{32}(E_{C.P}, \Delta T_{C.P}). \end{aligned}$$

Учитывая сделанные допущения и принятые обозначения, переменную часть годовых приведенных затрат можно представить в виде

$$П = [C_{\Sigma Л} \cdot E_{32} + C_T \cdot m_T + C_X \cdot m_X + Z_{11} + Z_{12} + Z_{21} + Z_{22} + Z_{31} + Z_{32}] \cdot \tau_T \cdot$$

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

Задача оптимизации режима работы комплекса решена ее сведением к безусловной оптимизации, использованием оператора Лагранжа

$$L_{\mathcal{L}} = \left[ \begin{array}{l} C_{\mathcal{E}L} \cdot E_{32} + C_T \cdot m_T + C_X \cdot m_X + Z_{11} + Z_{12} + \\ + Z_{21} + Z_{22} + Z_{31} + Z_{32} + \lambda_2 \cdot (e_2 - E_2) + \\ + \lambda_3 \cdot (e_3 - E_3) \end{array} \right] \cdot \tau_{24} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $\lambda_2, \lambda_3$  – неопределенные множители Лагранжа;

$\tau_{24}$  – время работы оборудования в течение суток;

$E_{32}$  – эксергия, подводимая к насосу;

$E_2, E_3$  – эксергия, отводимая от хладагента в конденсаторе и от рассола в испарителе.

Целевая функция (4) в эксергетических терминах определяется явными зависимостями потоков эксергии в АБХМ от независимых переменных (эксплуатационных и управляющих).

Значения эксергетических потоков  $E_2, E_3$  находились с использованием формул эксергетической модели (1).

Для нахождения условий существования условного экстремума были взяты частные производные Лагранжа (4) по всем переменным (исходным, оптимизирующим и дополнительным, введенным уравнениями связи) и приравнены к нулю. Частные производные по  $E_i$  позволяют вычислить значения неопределенных множителей Лагранжа  $\lambda_2$

$$\frac{\partial L_{\mathcal{L}}}{\partial E_2} = \tau_{24} \cdot \frac{\partial}{\partial E_2} (C_T \cdot m_T + C_X \cdot m_X + Z_{11} + Z_{12} - \lambda_2 \cdot E_2) = 0. \quad (5)$$

Так как  $\tau_{24} = 0$ , то нулю должно быть равно значение производной. В результате неопределенный множитель Лагранжа  $\lambda_2$  определяется по формуле

$$\lambda_2 = \frac{\partial}{\partial E_2} (C_T \cdot m_T + C_X \cdot m_X + Z_{11} + Z_{12}). \quad (6)$$

Аналогично определяется  $\lambda_3$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_{\mathcal{L}}}{\partial E_3} &= \tau_{24} \cdot \frac{\partial}{\partial E_3} (Z_{21} + Z_{22} + \lambda_2 \cdot E_2 - \lambda_3 \cdot E_3) = 0; \\ \lambda_3 &= \frac{\partial}{\partial E_3} (Z_{21} + Z_{22} + \lambda_2 \cdot E_2). \end{aligned} \quad (7)$$

Система уравнений (6) и (7) позволила определить действительное значение экономических показателей  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ . Частные производные по оптимизирующим переменным после преобразований имеют вид

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

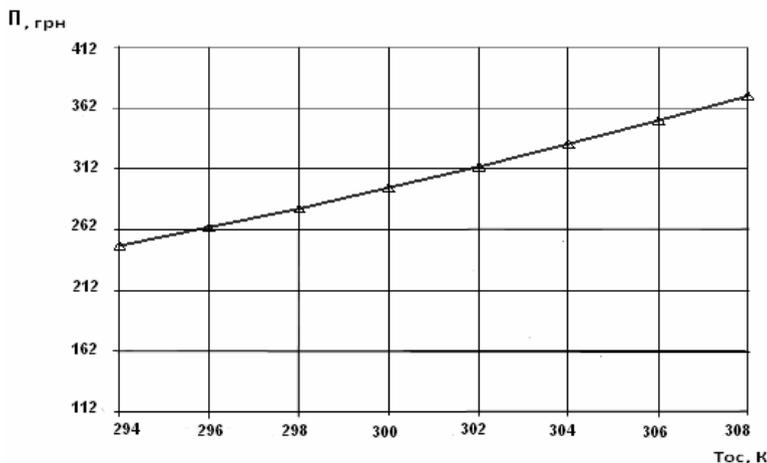
---

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial \Delta m_T} (Ц_T \cdot m_T + Ц_X \cdot m_X + Z_{11} + Z_{12}) &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \Delta m_X} (Ц_T \cdot m_T + Ц_X \cdot m_X + Z_{11} + Z_{12}) &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \Delta T_T} (Ц_T \cdot m_T + Ц_X \cdot m_X + Z_{11} + Z_{12}) &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \Delta T_X} (Ц_T \cdot m_T + Ц_X \cdot m_X + Z_{11} + Z_{12}) &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \Delta T_{K.P}} (Ц_T \cdot m_T + Ц_X \cdot m_X + Z_{11} + Z_{12}) &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \Delta T_{C.P}} (Ц_T \cdot m_T + Ц_X \cdot m_X + Z_{11} + Z_{12}) &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \Delta m_B} (Z_{21} + Z_{22} + \lambda_2 \cdot E_2) &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \Delta m_P} (Z_{21} + Z_{22} + \lambda_2 \cdot E_2) &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \Delta T_B} (Z_{21} + Z_{22} + \lambda_2 \cdot E_2) &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \Delta T_P} (Z_{21} + Z_{22} + \lambda_2 \cdot E_2) &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \Delta m_{K.P}} (Ц_{\text{Э}} \cdot E_{32} + Z_{31} + Z_{32} + \lambda_3 \cdot E_3) &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \Delta m_{C.P}} (Ц_{\text{Э}} \cdot E_{32} + Z_{31} + Z_{32} + \lambda_3 \cdot E_3) &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \Delta T_{K.P}} (Ц_{\text{Э}} \cdot E_{32} + Z_{31} + Z_{32} + \lambda_3 \cdot E_3) &= 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \Delta T_{C.P}} (Ц_{\text{Э}} \cdot E_{32} + Z_{31} + Z_{32} + \lambda_3 \cdot E_3) &= 0.
 \end{aligned} \tag{8}$$

При проведении расчетов считалось, что  $T_{O.C}$  изменяется в пределах от 296 К до 308 К. Температура кипения хладагента  $T_0$  лежит в пределах от 276 К до 298,15 К. Совместным решением уравнений (5)-(8) были найдены необходимые условия минимального значения лагранжиана. То есть, переменная часть приведенных затрат, вычисленная по значениям минимизируемых переменных, определяемым из решения системы уравнений (8) с учетом (6) и (7) будет минимальной. Следовательно, системы уравнений (5)-(8) представляют собой записанное в общем виде аналитическое решение задачи статической оптимизации. Для решения сис-

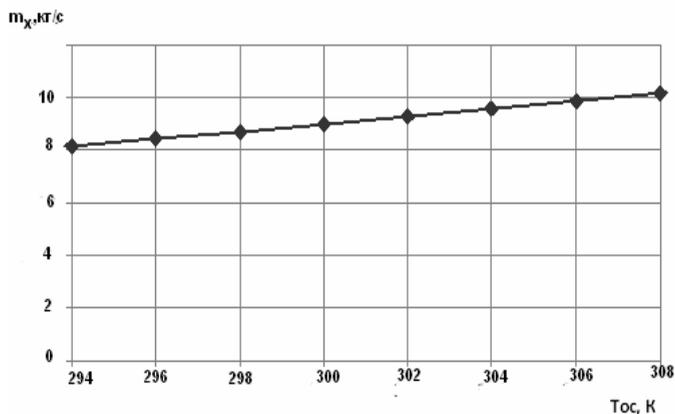
**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБИЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

темы уравнений, записанных в общем виде, использовались их представления в виде развернутых описаний соответствующих эксергетических потоков. В результате решения оптимизационной задачи были получены наборы значений, отражающие оптимальные законы изменения расхода сред ( $m_x, m_T, m_{C.P}, m_{K.P}, m_B, m_P$ ), оптимальные значения температур  $T_G, T_{T1}, T_{T2}, T_{Г.Х}, T_{Г.С.Р}, T_{Г.К.Р}$  АБХМ, обеспечивающие минимум приведенных затрат. Значения приведенных затрат, оптимального расхода хладагента АБХМ при различных расчетных значениях температуры окружающей среды в течение 24 ч приведены на рис. 5, 6.



*Рис. 5. Зависимости минимальных приведенных затрат от температуры окружающей среды*

На рис. 5 и 6 прослеживается степень влияния на оптимизируемые управляемые переменные СККВ расчетной температуры окружающей среды.



*Рис. 6. Зависимости оптимального расхода хладагента в АБХМ от температуры окружающей среды*

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

В результате решения оптимизационной задачи были получены наборы значений, отражающие оптимальные законы изменения приведенных затрат (рис. 5), расхода сред (рис. 6), обеспечивающие минимум приведенных затрат исследуемой АБХМ. Установленные оптимальные величины расходов регулируемых сред позволяют снизить приведенные затраты при эксплуатации АБХМ. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании выбора заданных значений параметров и диапазонов регулирования агрегатов АБХМ. Учет результатов статической термо-экономической оптимизации АБХМ при их автоматизации позволит конкретизировать заданные значения регулируемых параметров и осуществить управление подобными холодильными машинами по их эксергетическим показателям.

Расчётные значения эксергетических КПД, характеристики связей между отдельными агрегатами АБХМ, учёт взаимодействия с окружающей средой, термодинамическая оптимизация системы и её элементов послужили основой для разработки схемы САУ АБХМ, реализация которой возможна на основе использования современных электронных компонентов (рис.7).

В зависимости от величины отклонений текущих значений температуры рассола и температуры крепкого раствора ( $T_P$ ,  $T_{KP}$ ) и отклонений от их заданных значений ( $T_{з.Р}$ ,  $T_{з.КР}$ ), в САУ формируются управляющие воздействия  $U_P$  и  $U_{KP}$ , приложенные к электронному коммутатору (ЭК). Величины отклонений текущих значений температуры рассола и температуры крепкого раствора от их заданных значений  $\Delta T_P$  и  $\Delta T_{KP}$  используются для выбора в ЭК необходимых управляющих каналов. Тем самым обеспечиваются изменения транспортируемых сред  $m_X$ ,  $m_T$ ,  $m_{CP}$ ,  $m_{KP}$ ,  $m_B$ ,  $m_P$ .

В схеме разработанной САУ объединены все управляющие и контролирующие функции. В них используется единый многоканальный протокол обмена данными при управлении АБХМ. Автоматическая стабилизация состояний управляемых переменных в условиях нестационарности работы агрегатов АБХМ осуществляется изменениями потоков теплоносителя, растворов в агрегатах. САУ программно определяет: энергосберегающий режим работы АБХМ; вид управляющих воздействий на регулирующие органы; конфигурирование, законы регулирования и его параметры; задающие воздействия для контуров регулирования. При этом используется информация: с портов ввода о значениях контролируемых и регулируемых параметров; от органов управления; о заданных величинах параметров. Структура разработанной САУ АБХМ (рис.7) отличается: доступностью элементной базы и комплектующих; соответствием стандартам по электрическим параметрам, коммуникационным протоколам и инструментальным средствам; соответствием средствам конфигурирования и прикладного программирования систем конечным пользователем. Схема САУ технически просто реализуется в рамках любых программ-

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБИЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

руемых управляющих устройств, цена которых в настоящее время минимальна.

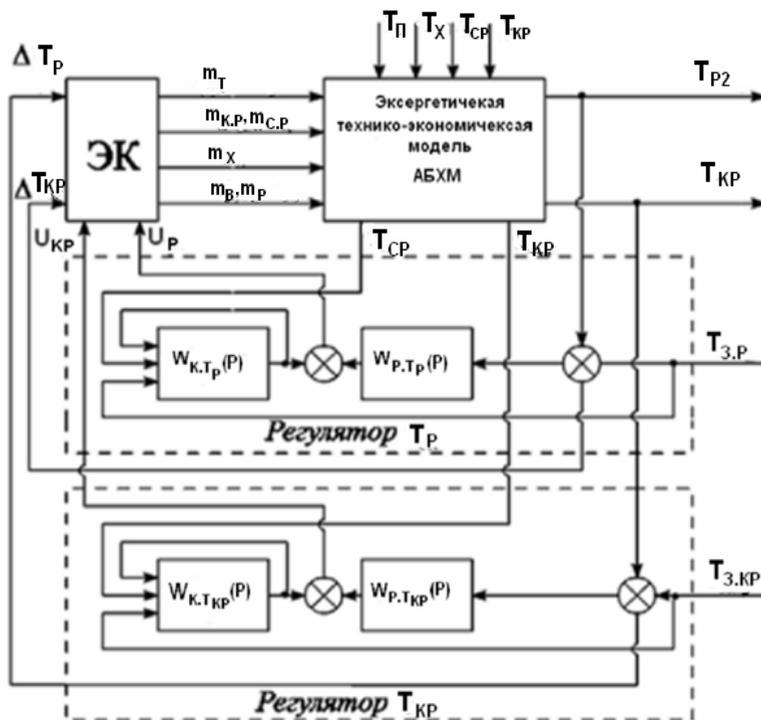


Рис. 7. Функциональная схема устройства управления АБХМ

Таким образом, разработанная эксергетическая технико-экономическая модель АБХМ учитывает: термодинамические характеристики связей между отдельными агрегатами; расчетные значения эксергетических КПД; приведенные затраты. Проведенный термодинамический анализ АБХМ, позволяет выявить элементы машины, характеризующиеся наибольшей величиной энергетических потерь. Предлагаемая методика комплексной оптимизации АБХМ, разработанная на основе термоэкономического подхода, позволяет получить аналитическое решение оптимизационной задачи и определить значения расчетных разностей температур в агрегатах машины, соответствующих минимальной величине переменной части приведенных затрат, в зависимости от внешних условий работы АБХМ.

Применение разработанной эксергетической технико-экономической модели и последующая оптимизация АБХМ и ее агрегатов может послужить основой для проектирования, модернизации и эксплуатации энергоэффективных АБХМ. Использование разработанной модели и ме-

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
УПРАВЛЯЕМЫХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

---

тодики оптимизации в практике конструирования АБХМ обеспечит сокращение величины переменной части приведенных затрат на 10 %-15 % за счет уменьшения эксплуатационных расходов (расходов охлаждающей воды, электроэнергии, а в некоторых случаях и теплоты). Внедрение в практику САУ АБХМ по ее расчетным эксергетическим характеристикам должно помочь в реализации управления АБХМ с пониженными приведенными затратами.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Эксергетические расчеты технических систем: Справочное пособие // В.М. Бродянский, Г.П. Верхивкер, Я.Я. Карчев и др. – К.: Наук.думка, 1991. – 360 с.*
2. *Banasiak K., Koziola J. Mathematical modelling of a LiBr-H<sub>2</sub>O absorption chiller including two-dimensional distributions of temperature and concentration fields for heat and mass exchangers /International Journal of Thermal Sciences. – 2009. – № 48 (9). – P. 1755-1764.*
3. *Kaita Y. Thermodynamic properties of lithium bromide-water solutions at high temperatures /International Journal of Refrigeration. – 2001. – № 24. – P. 374-390.*
4. *Misra R. D., Sahoo P. K., Sahoo S. Thermoeconomic optimization of a single effect water/LiBr vapour absorption refrigeration system / International Journal of Refrigeration. – 2003. – № 26. – P.158-169.*
5. *Talbi M. M., Agnew B. Exergy analysis: An absorption refrigerator using lithium bromide and water as the working fluids / Appl. Therm. Eng. – 2000. – № 20. – P. 619-630.*

*Надійшла 04.05.2011*

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Інформаційні технології» Одеського національного морського університету **В.Х. Кирилов**.

## О ПРИБЛИЖЕННОМ ОПИСАНИИ КИНЕТИКИ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ТОПЛИВА В ОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ

*При некоторых упрощениях получены формулы для длины пути и времени жизни капли, испаряющейся в однородном потоке. Проиллюстрированы зависимости этих величин от начального значения числа Рейнольдса и безразмерной константы испарения.*

*При деяких спрощеннях отримано формули для довжини шляху та часу життя краплі, що випаровується у однорідному потоці. Проілюстровано залежності цих величин від початкового значення числа Рейнольдса і безрозмірної сталої випаровування.*

**Ключевые слова:** испарение, ускорение капли, время жизни, длина пути.

**Введение.** В двигателях разнообразной конструкции и принципов работы процессы подготовки горючей смеси (испарение, смешение горючего и окислителя) наиболее эффективно осуществляются в потоке, где они значительно интенсифицируются при обтекании капли топлива, а также механизмами механического и турбулентного перемешивания [1, 2]. Важными величинами для количественного описания этих процессов в факеле распыла форсунки, а также свободной капли в потоке [3] являются времена жизни  $t_{исп}$  и длины пути  $l_1$  капель, определяющие длину жидкофазной струи  $l$  распыла форсунки и концентрацию капель в ней, а также концентрацию паров топлива в области смешения компонент 2 (рис. 1). Однако система дифференциальных уравнений кинетики испарения и ускорения капли, из которой определяются эти величины, в общем случае не поддается прямому интегрированию, поэтому настоящая работа посвящена получению приближенных инженерных формул для  $t_{исп}$  и  $l_1$ .

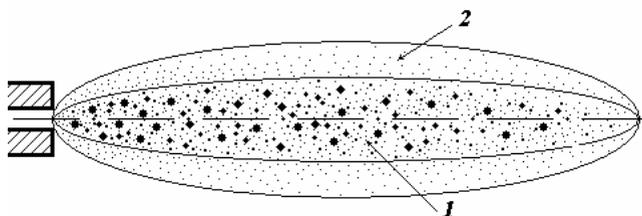


Рис. 1. Схема факела распыла форсунки

**Система уравнений.** Интегрирование уравнений кинетики испарения и ускорения осложняется необходимостью учитывать влияние обтекающего каплю потока на скорость испарения и зависимостью коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_d$  от числа Рейнольдса капли

**О ПРИБЛИЖЕННОМ ОПИСАНИИ КИНЕТИКИ ИСПАРЕНИЯ  
КАПЛИ ТОПЛИВА В ОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ**

$Re_{\dot{\epsilon}} = \rho_{\infty} 2r(V_{\infty} - w_{\dot{\epsilon}}) / \mu_{\infty}$ , которая существенно влияет на закон ее движения  $x_{\dot{\epsilon}}(t)$ . В свою очередь, скорость испарения зависит от относительной скорости потока и капли  $V_{\infty} - w_{\dot{\epsilon}}(t)$ . Это взаимное влияние кинетики испарения и ускорения приводит к необходимости рассчитывать одновременно с радиусом испаряющейся капли  $r(t)$  ее скорость  $w_{\dot{\epsilon}}(t)$ , которые находятся как решение системы уравнений движения и испарения капли

$$\begin{cases} \frac{dW_k}{d\tau} = \frac{3 \alpha^{0,5} C_d (1 - W_k)^2}{2 r'}; \\ \frac{dr'}{d\tau} = -\frac{I' Nu_k}{16r'}; \end{cases} \quad r'(0) = 1, \quad W_k(0) = 0, \quad (1)$$

где  $W_{\dot{\epsilon}} = w_{\dot{\epsilon}} / V_{\infty}$ ,  $\tau = t / t_0$ ,  $t_0 = 2r_0 / \alpha^{0,5} V_{\infty}$ ,  $r' = r / r_0$ ,  $\alpha = \rho_{\infty} / \rho_{\dot{\epsilon}}$  – отношение плотностей газа и капли,  $\dot{E}' = 2\dot{E} / (\alpha^{0,5} r_0 V_{\infty})$ ;

$\dot{E}$  – константа испарения;

$Nu_{\dot{\epsilon}}$  – число Нуссельта для капли [4].

Известен целый ряд полуэмпирических соотношений, аппроксимирующих зависимости  $C_d(Re_{\dot{\epsilon}})$ ,  $Nu_{\dot{\epsilon}}(Re_{\dot{\epsilon}})$ , которые в общем виде могут быть записаны так [5]:

$$C_d = \frac{24}{Re_{\dot{\epsilon}}} (1 + a_1 Re_{\dot{\epsilon}}^{0,5} + a_2 Re_{\dot{\epsilon}} + \dots), \quad Nu_{\dot{\epsilon}} = 2(1 + b Re_{\dot{\epsilon}}^{0,5} + \dots), \quad (2)$$

причем в интересующем нас диапазоне  $0 < Re_{\dot{\epsilon}} < 2000$ , характерном для работы форсунок, можно остановиться на соотношениях Кюртена ( $a_1 = 0,25$ ,  $a_2 = 0,012$ ) и Ранца – Маршалла ( $b = 0,265$ ).

Вид соотношений (2) не позволяет произвести прямое интегрирование системы (1). В этой ситуации целесообразно искать приближенное решение, тем более учитывая сам приближенный характер зависимостей (2). Ниже производится построение такого решения и выводятся формулы для  $\tau_{\dot{\epsilon}n\dot{\epsilon}}$  и  $L_{\dot{\epsilon}} = l_{\dot{\epsilon}} / 2r_0$ .

**Построение приближений.** Исключим из (1) время, разделив первое уравнение на второе

$$\frac{dW_{\dot{\epsilon}}}{dr'} = -\frac{12\alpha^{0,5} \tilde{N}_d}{\dot{E}' Nu_{\dot{\epsilon}}} (1 - W_{\dot{\epsilon}})^2. \quad (3)$$

Возникающее при этом отношение  $C_d / Nu_{\dot{\epsilon}}$  в диапазоне  $0 < Re_{\dot{\epsilon}} < 2000$  может быть аппроксимировано зависимостью

**О ПРИБЛИЖЕННОМ ОПИСАНИИ КИНЕТИКИ ИСПАРЕНИЯ  
КАПЛИ ТОПЛИВА В ОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ**

$$\frac{C_d}{Nu_{\dot{\epsilon}}} = \frac{12}{Re_{\dot{\epsilon}}} (1 + c Re_{\dot{\epsilon}}^{0,5}), \quad (4)$$

причем схожий характер поведения функций  $C_d(Re_{\dot{\epsilon}})$ ,  $Nu_{\dot{\epsilon}}(Re_{\dot{\epsilon}})$  в этом диапазоне приводит к малому значению  $c \approx 0,035$ , при котором погрешность такой аппроксимации составляет не более  $\pm 7\%$ .

Нахождение интересующих нас соотношений разобьем на два этапа. Учитывая малость значения  $c$ , положим в нулевом приближении

$$\frac{C_d}{Nu_{\dot{\epsilon}}} = \frac{12}{Re_{\dot{\epsilon}}}. \text{ Благодаря малости } c \text{ диапазон действия нулевого прибли}$$

жения значительно шире, чем диапазон  $Re_{\dot{\epsilon}} < 1$  применимости в отдельности приближений Стокса для силы аэродинамического сопротивления и Срезневского для скорости испарения (здесь  $Re_{\dot{\epsilon}0}$  – значение  $Re_{\dot{\epsilon}}$  при  $\tau = 0$ ). Его границы можно оценить как  $Re_{\dot{\epsilon}0} < 100$ , что подтверждается расчетными данными, приведенными на рис. 2. Интегрируя (3) в нулевом приближении, получаем

$$W_{\dot{\epsilon}}^0 = 1 - r'^h, \quad \text{где } h = \frac{144\alpha^{0,5}}{\dot{E}' Re_{\dot{\epsilon}0}} = 36 \frac{\mu_{\infty}}{\rho_{\dot{\epsilon}} \dot{E}'}. \quad (5)$$

В диапазоне действия нулевого приближения  $Re_{\dot{\epsilon}0} < 100$  соотношение между скоростью и радиусом испаряющейся капли регулируется единственным параметром – обратной безразмерной константой испарения  $h$ . Влияние вязкости потока и плотности капли на соотношение между темпами испарения и ускорения капли в (5) связано с проявлением силы трения ( $\approx \mu_{\infty}$ ), сдвигающей динамическое равновесие между этими процессами в сторону большего влияния ускорения капли, и ее инерционности ( $\approx \rho_{\dot{\epsilon}}$ ), имеющей обратную тенденцию. Течениям в энергетических установках соответствуют значения  $h < 1$ . Соотношение (5) показывает, что при малых  $h$  испарение проходит более эффективно, т.к. большая часть процесса проходит при интенсивном обдувании потоком со значительной относительной скоростью (режим быстрого испарения). При больших  $h$  капелька быстро ускоряется до скорости, сравнимой со скоростью потока  $V_{\infty}$ , в то время как ее радиус изменяется мало, поэтому испарение интенсифицируется незначительно (режим медленного испарения).

Теперь уточним  $W_{\dot{\epsilon}}(r')$ , положив в правой части (3) с учетом нулевого приближения  $Re_{\dot{\epsilon}} = \rho_{\infty} 2r(V_{\infty} - w_{\dot{\epsilon}}^0) \mu_{\infty}^{-1} = r'(1 - W_{\dot{\epsilon}}^0) \rho_{\infty} 2r_0 V_{\infty} \mu_{\infty}^{-1} =$

**О ПРИБЛИЖЕННОМ ОПИСАНИИ КИНЕТИКИ ИСПАРЕНИЯ  
КАПЛИ ТОПЛИВА В ОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ**

$=r'^{h+1} \text{Re}_{\dot{\epsilon}0}$ . Проинтегрировав после этого (3), получим относительную скорость как функцию радиуса испаряющейся капли

$$1 - W_{\dot{\epsilon}} = r'^h \exp\left(\frac{2ch}{h+1} \text{Re}_{\dot{\epsilon}0}^{0,5} \left(r'^{(h+1)/2} - 1\right)\right). \quad (6)$$

В момент полного испарения  $r'=0$  скорость капли равна скорости потока.

Таким образом, в первом приближении появляется влияние  $\text{Re}_{\dot{\epsilon}0}$ . На рис. 2 приведены зависимости  $1 - W_{\dot{\epsilon}}(r')$ , иллюстрирующие соотношение между кинетикой испарения и ускорения капли в режимах быстрого испарения при  $h=0,2$  (верхний пучок) и медленного испарения при  $h=1,5$  (нижний пучок). В каждом из пучков верхняя кривая рассчитана для нулевого приближения (по уравнению (5), нижняя – для первого (по уравнению (6), средняя – точное (численное) решение системы (1).

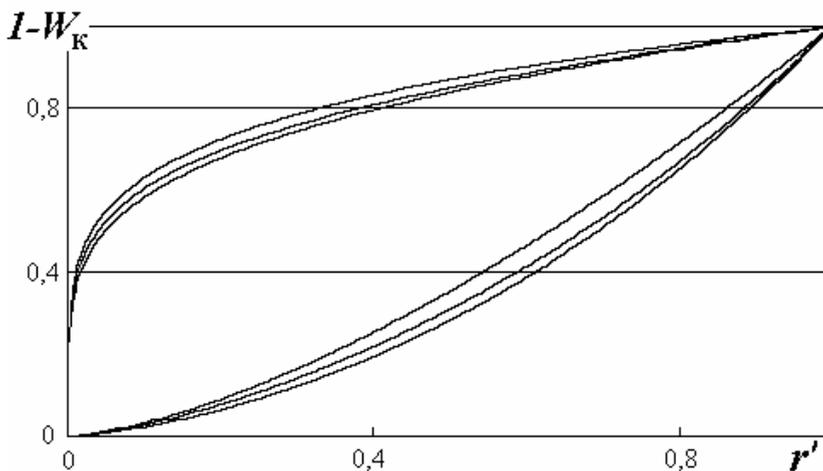


Рис. 2. Верхние кривые –  $h=0,2$ ,  $\text{Re}_{\dot{\epsilon}0}=80,2$ , нижние –  $h=1,5$ ,  $\text{Re}_{\dot{\epsilon}0}=85,6$

**Время жизни капли в потоке.** Исключим с помощью (6) скорость в выражении (2) для  $\text{Nu}_{\dot{\epsilon}}(\text{Re}_{\dot{\epsilon}})$  и, введя безразмерную поверхность капли  $S=r'^2$ , запишем второе уравнение системы (1) в виде

$$-\tau_S^{-1} d\tau = \left(1 + b \text{Re}_{\dot{\epsilon}0}^{0,5} S^{(h+1)/4} \exp\left(\frac{ch}{h+1} \text{Re}_{\dot{\epsilon}0}^{0,5} \left(S^{(h+1)/4} - 1\right)\right)\right) dS = f(S) dS, \quad (7)$$

где  $\tau_S = 4/\dot{E}'$  – время испарения капли в соответствии с законом Срезневского. Для интегрирования (7) воспользуемся методом коллокаций [6], позволяющим получить приближенное аналитическое решение диффе-

**О ПРИБЛИЖЕННОМ ОПИСАНИИ КИНЕТИКИ ИСПАРЕНИЯ  
КАПЛИ ТОПЛИВА В ОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ**

ренциального уравнения. Заменяем  $f(S)$  аппроксимирующей функцией вида  $f_a(S) = \alpha_1 - \beta_1 S^{q_1} + \gamma_1 S^{q_2}$ , где  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  определяются из условий совпадения  $f(S)$  и  $f_a(S)$  в точках коллокации  $S=0$  и  $S=1$ :  $f(0)=1$ ,  $f(1) = (1 + b \text{Re}_{\varepsilon_0}^{0,5})^{-1}$ ,  $df/dS|_{S=1} = -b q_1 \text{Re}_{\varepsilon_0}^{0,5} (1 + \tilde{n} h / (h+1)) f^{-2}(1)$ . Значение  $q_1 = (h+1)/4$  удовлетворяет требованиям асимптотического поведения  $f(S)$  при малых  $S$ :  $df/dS \approx S^{(h-3)/4}$ ; при этом выражение для  $df/dS$  получено непосредственно из системы (1). Значение  $q_2$  подбиралось из условия минимизации невязки приближенного и численного решений. Подставив найденное выражение для  $f_a(S)$  в (7) и проинтегрировав при начальном условии  $S(0)=1$ , найдем в неявном виде закон испарения капли в потоке

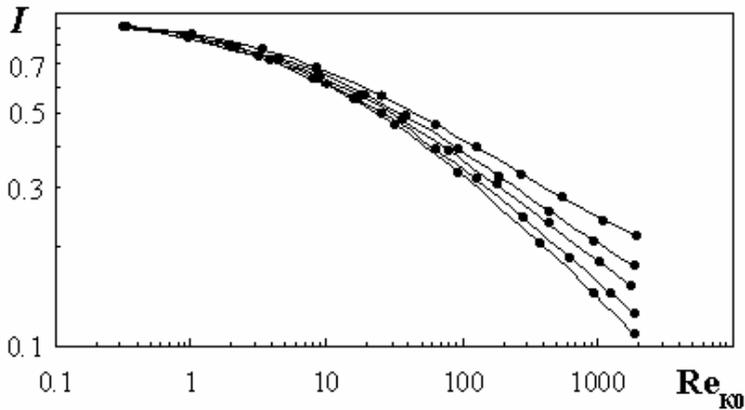
$$\tau = \tau_S \left( 1 - S - \frac{\beta_1}{q_1 + 1} (1 - S^{q_1 + 1}) + \frac{\gamma_1}{q_2 + 1} (1 - S^{q_2 + 1}) \right), \quad (8)$$

где  $q_1 = \frac{h+1}{4}$ ,  $q_2 = \frac{h}{4}$ ,  $\beta_1 = b \text{Re}_{\varepsilon_0}^{0,5} \left( 1 - h \left( 1 - \frac{c}{b} \right) b \text{Re}_{\varepsilon_0}^{0,5} \right) (1 + b \text{Re}_{\varepsilon_0}^{0,5})^{-2}$ ,  $\gamma_1 = -(h+1) b \text{Re}_{\varepsilon_0} \left( b - \frac{ch}{h+1} \right) (1 + b \text{Re}_{\varepsilon_0}^{0,5})^{-2}$ . Отсюда время полного испарения

$$\tau_{\text{эп}} = \tau_S \left( 1 - \frac{\beta_1}{q_1 + 1} + \frac{\gamma_1}{q_2 + 1} \right). \quad (9)$$

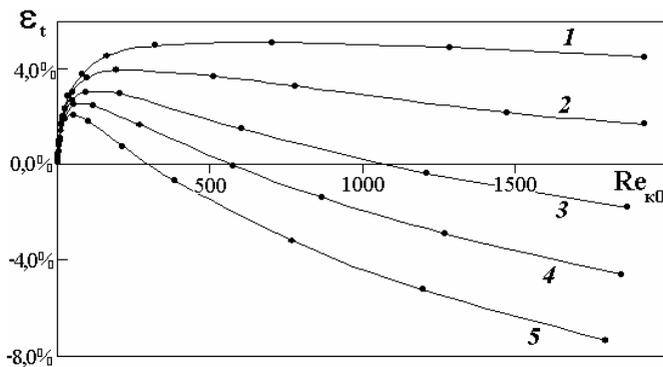
Введем коэффициент интенсификации испарения  $I = \tau_{\text{эп}} / \tau_S$ , показывающий во сколько раз уменьшается время испарения капли в потоке по сравнению с испарением по закону Срезневского в неподвижной атмосфере. На рис. 3 (шкала логарифмическая) приведены зависимости  $I(\text{Re}_{\varepsilon_0})$  для различных значений  $h$ , которые показывают, что время жизни капель в скоростных потоках сокращается до 10 раз при  $h=0,2$  и до 4 раз при  $h=1,5$ .

**О ПРИБЛИЖЕННОМ ОПИСАНИИ КИНЕТИКИ ИСПАРЕНИЯ  
КАПЛИ ТОПЛИВА В ОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ**



*Рис. 3. Зависимости  $I(Re_{\infty 0})$ , сверху вниз:  
 $h=1,5$ ;  $h=1,0$ ;  $h=0,7$ ;  $h=0,4$ ;  $h=0,2$*

На рис. 4 приведены зависимости относительной погрешности  $\varepsilon_t(Re_{\infty 0})$  определения времени жизни капли по формуле (9) в сравнении со значениями, полученными численным интегрированием системы (1) с применением метода Рунге – Кутты четвертого порядка аппроксимации. В широком диапазоне значений  $Re_{\infty 0}$  и  $h$  величина  $\varepsilon_t$  находится в пределах  $-8\% < \varepsilon_t < 5\%$ , что приемлемо при решении практических задач.



*Рис. 4. Зависимости  $\varepsilon_t(Re_{\infty 0})$ :  
1 –  $h=0,2$ ; 2 –  $h=0,4$ ; 3 –  $h=0,7$ ; 4 –  $h=1,0$ ; 5 –  $h=1,5$*

Закон испарения  $r'(\tau)$ , зависимость массы испаряющейся капли  $M(\tau) = m/m_{\infty 0} = r'^3(\tau)$  и площади ее поверхности от времени  $S(\tau) = r'^2(\tau)$ , а также испаренная масса  $M_{ev}(\tau) = 1 - M_{\hat{e}}(\tau)$  могут быть получены из (8) табулированием.

**О ПРИБЛИЖЕННОМ ОПИСАНИИ КИНЕТИКИ ИСПАРЕНИЯ  
КАПЛИ ТОПЛИВА В ОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ**

Для нахождения длины пути капли  $l_i$  найдем ее траекторию на плоскости  $(r, x)$ , где  $x$  – расстояние, пройденное каплей. Учитывая, что

$$W_{\hat{e}} = \alpha^{0,5} dx'_{\hat{e}} / d\tau,$$

где  $x'_{\hat{e}} = x_{\hat{e}} / 2r_0$ , из (6) найдем  $\alpha^{0,5} dx'_{\hat{e}} / d\tau = 1 - r'^h \exp\left(2 \frac{ch}{h+1} \text{Re}_{\hat{e}0}^{0,5} (r'^{(h+1)/2} - 1)\right)$  и, исключив из полученного соотношения  $\tau$  с помощью второго уравнения (1), получим

$$\frac{\alpha^{0,5}}{2\tau_S} dx'_{\hat{e}} = \frac{r'^{h+1} \exp\left(\frac{ch}{2q_1} \text{Re}_{\hat{e}0}^{0,5} (r'^{(h+1)/2} - 1)\right) - r'}{1 + b \text{Re}_{\hat{e}0}^{0,5} r'^{(h+1)/2} \exp\left(\frac{ch}{h+1} \text{Re}_{\hat{e}0}^{0,5} (r'^{(h+1)/2} - 1)\right)} = g(r') dr'. \quad (10)$$

Для решения (10) вновь воспользуемся методом коллокаций, выбирая аппроксимирующую функцию для  $g(r')$  в виде

$$g_a(r') = \beta_2 r'^{\lambda_1} + \gamma_2 r'^{\lambda_2},$$

где  $\beta_2, \gamma_2, \lambda_1 < \lambda_2$  подбираются из условий совпадения  $g_a(r')$  и  $g(r')$  в точках коллокации  $r'=0, r'=0,5$  и  $r'=1$ . Используя выражение  $g(r') = -2r'W_{\hat{e}}(r')/\text{Nu}_{\hat{e}}(r')$ , которое следует непосредственно из системы (1), найдем  $g(0)=0, g(1)=0, g(0,5)=g_x = -W_{\hat{e}}(0,5)/\text{Nu}_{\hat{e}}(0,5)$ . Выполним требование для производной, выражение для которой можно также найти из системы (1)  $dg/dr'|_{r'=0} = -1$ . Таким образом, получим  $\beta_2 = -\gamma_2 = -1, \lambda_1 = 1, \lambda_2 = 1 - \log_2(1 + 2g_x)$ , т.е.

$$g_a(r') = -r' + r'^{1 - \log_2(1 + 2g_x)}. \quad (11)$$

Интегрируя уравнение (10) с функцией (11), получаем

$$x'_{\hat{e}} = \frac{\tau_S}{\alpha^{0,5}} \left( 1 - r'^2 + \frac{2}{2 - \log_2(1 + 2g_x)} (r'^{2 - \log_2(1 + 2g_x)} - 1) \right). \quad (12)$$

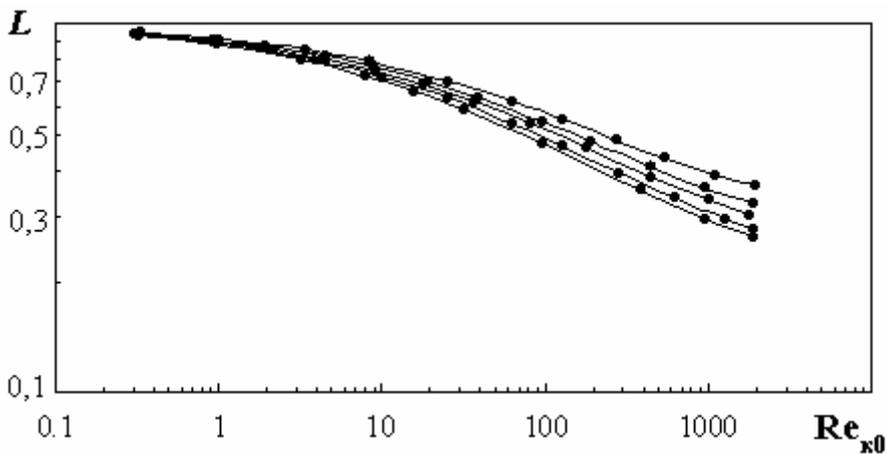
Отсюда длина пути капельки

$$L_i = \frac{\tau_S}{\alpha^{0,5}} \frac{-\log_2(1 + 2g_x)}{2 - \log_2(1 + 2g_x)}. \quad (13)$$

**О ПРИБЛИЖЕННОМ ОПИСАНИИ КИНЕТИКИ ИСПАРЕНИЯ  
КАПЛИ ТОПЛИВА В ОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ**

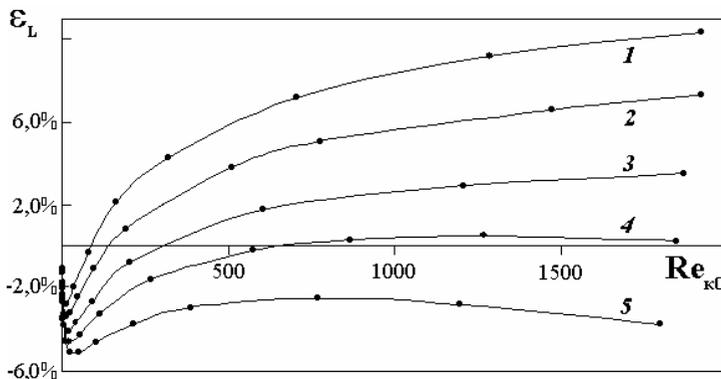
При  $Re_{\varepsilon 0} \rightarrow 0$  из (13) получим значение длины пути капли  $L_{\tau S} = \frac{\tau_S}{\alpha^{0,5}} \frac{h}{h+2}$ , следующее из системы (1) точно при испарении в соответствии с законом Срезневского, т.е. при  $a_1=0$ ,  $a_2=0$ ,  $Nu_{\varepsilon}=2$ .

На рис. 5 приведены зависимости  $L=L_i/L_{\tau S}$  от  $Re_{\varepsilon 0}$  для различных  $h$ , которые показывают, что интенсификация испарения потоком уменьшает длину пути капли до 2,5 – 3 раз, в сравнении с испарением по закону Срезневского.



*Рис. 5. Зависимости  $L(Re_{\varepsilon 0})$ , сверху вниз:*

*1 –  $h=1,5$ ; 2 –  $h=1,0$ ; 3 –  $h=0,7$ ; 4 –  $h=0,4$ ; 5 –  $h=0,2$*



*Рис. 6. Зависимости  $\varepsilon_L(Re_{\varepsilon 0})$ :*

*1 –  $h=0,2$ ; 2 –  $h=0,4$ ; 3 –  $h=0,7$ ; 4 –  $h=1,0$ ; 5 –  $h=1,5$*

## О ПРИБЛИЖЕННОМ ОПИСАНИИ КИНЕТИКИ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ТОПЛИВА В ОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ

На рис. 6 для различных значений  $h$  приведены зависимости погрешности  $\varepsilon_L(\text{Re}_{\text{э}0})$  определения длины пути капли  $L_T$ , рассчитанной по формуле (13) в сравнении с точными значениями, полученными численным интегрированием системы (1) с применением метода Рунге-Кутты четвертого порядка аппроксимации.

Закон движения испаряющейся капли  $x'_\xi(\tau)$  может быть получен из (12) табулированием с помощью (8).

**Заключение.** Полученные приближенные формулы для времени жизни и длины пути капли топлива, испаряющейся в однородном потоке, имеют приемлемую погрешность в широком диапазоне определяющих параметров  $h$ ,  $\text{Re}_{\text{э}0}$ , и могут, следовательно, применяться при расчете факела распыла форсунок и решении других практических задач. Анализ показывает, что интенсификация процесса испарения обтекающим каплю потоком существенно уменьшает величины  $\tau_{\text{эп}i}$ ,  $L_T$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фомин Ю.Я., Горбань А.И., Добровольский В.В. и др. Судовые двигатели внутреннего сгорания. – Л.: Судостроение, 1989. – 344 с.
2. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, 1984. – 396 с.
3. Гирин А.Г. Уравнения кинетики дробления капли в скоростном потоке газа // ИФЖ. – 2011. – Т. 84. – № 2. – С. 248-254.
4. Ламбарайс С., Комбс Л. Экспериментальное изучение стационарного горения в ракетной камере смеси жидкого кислорода с керосином и теория горения распыленной струи // Детонация и двухфазное течение. – М.: Мир, 1966. – С. 270-310.
5. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами / Л. Е. Стернин, Б. Н. Маслов, А. А. Шрайбер, А. М. Подвысоцкий. – М.: Машиностроение, 1980. – 272 с.
6. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. – М.: Изд-во физ-мат. литературы, 1963. – 400 с.

Надійшла 01.02. 2011

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету **В.Г. Івановський**.

**ДИЗЕЛЬНАЯ ФОРСУНКА  
С УПРАВЛЯЕМЫМ ВПРЫСКИВАНИЕМ ТОПЛИВА**

---

*Описана опытная гидроуправляемая форсунка с регулируемым законом подачи топлива. Установлено, что изменением давления управляющей жидкости можно изменять закон подачи топлива в цилиндр двигателя во время его работы.*

*Описано дослідну гідрокеровану форсунку з регульованим законом подання палива. Встановлено, що зміною тиску керованої рідини можна змінити закон подання палива у циліндр двигуна під час його роботи.*

*The experimental hydro-controlled injector with the regulated law of fuel supply is described. It is determined that by changing the controlled liquid pressure it is possible to change the law of fuel supply into the engine cylinder during its operation.*

**Ключевые слова:** дизели, форсунка, гидравлическое управление, закон подачи.

Основной задачей (**проблемой**) современного дизелестроения и эксплуатации является повышение топливной экономичности дизелей на частичных нагрузках, что также способствует повышению их надежности и моторесурса.

Известны многочисленные попытки создания специальной топливной аппаратуры для получения различных законов подачи топлива в цилиндр двигателя внутреннего сгорания [1, 2]. Несмотря на значительное количество предложений, изобретений и патентов, большинство из них ввиду своей сложности или недостаточной надежности в работе не нашли практического применения. Более целесообразно изменение характеристики впрыскивания непосредственно перед распыливающими отверстиями, так как в этом случае устраняется возможность искажения импульса давления в нагнетательном трубопроводе и объемах у насоса (объеме камеры нагнетания  $V_n$  и объеме штуцера  $V_n'$ ).

**Целью** данной работы является получение различных законов подачи топлива на опытной гидроуправляемой форсунке с регулируемым законом подачи топлива.

Один из исследованных вариантов форсунки изображен на рис.1. Опытная форсунка имеет гидроуправляющую полость, состоящую из объема над верхним торцом иглы распылителя и канала 3 для подвода управляющей жидкости, снабжена обратным 9 и перепускным 5 клапанами. Для уменьшения объема гидроуправляющей полости в корпус штатной форсунки вставляются втулки 4.

Канал 3 во время процесса впрыскивания, при подъеме иглы 1 под действием высокого давления топлива в объеме 2, разъединяется с остальным объемом 8 при помощи обратного клапана 9, нагруженного пруж-

ДИЗЕЛЬНАЯ ФОРСУНКА  
С УПРАВЛЯЕМЫМ ВПРЫСКИВАНИЕМ ТОПЛИВА

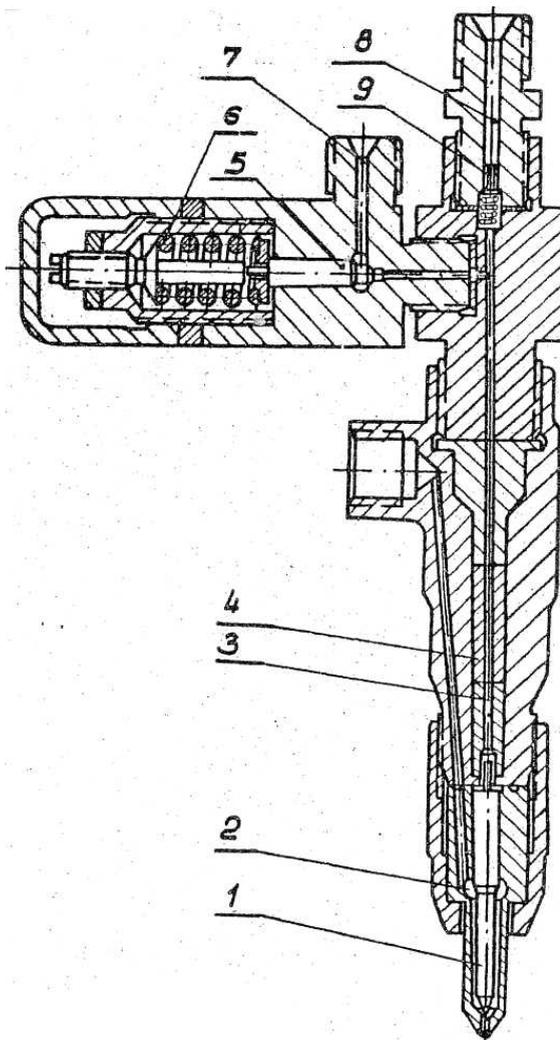


Рис. 1. Гидроуправляемая форсунка с регулируемым законом подачи:  
1 – игла форсунки; 2 – подигольчатая полость; 3 – канал подвода управляющей жидкости к игле; 4 – втулки; 5 – перепускной клапан;  
6 – пружина; 7 – канал перепуска управляющей жидкости в бачок;  
8 – канал подвода управляющей жидкости к форсунке;  
9 – обратный клапан

жиной малой жесткости. Этот клапан перекрывает канал 8, как только давление в объеме гидроуправляющей полости, вследствие подъема иглы 1, превысит начальное давление управляющей жидкости. Но повышение давления будет до тех пор, пока давление, соответствующее начальной затяжке пружины 6 перепускного клапана 5 не станет меньше давления

**ДИЗЕЛЬНАЯ ФОРСУНКА  
С УПРАВЛЯЕМЫМ ВПРЫСКИВАНИЕМ ТОПЛИВА**

управляющей жидкости, вследствие этого игла 5 начнет подниматься, перепуская часть жидкости обратно в бачок. Изменение закона подачи топлива происходит следующим образом: пока клапан 5 закрыт, игла распылителя поднимается медленно и на сравнительно небольшую высоту, вследствие этого проходная площадь под конусом иглы также будет мала. Следовательно, будет незначительным и количество топлива, впрыскиваемое в цилиндр двигателя. Изменяя начальное давление управляющей жидкости, можно изменять начальную высоту подъема иглы и, тем самым величину начальной порции топлива. После подъема иглы клапана 5 давление в гидроуправляющей полости резко уменьшится, что вызовет быстрый подъем иглы и такое же быстрое увеличение проходной площади под ее конусом, а следовательно, и количество топлива, впрыскиваемого в цилиндр двигателя. Такой способ изменения закона подачи дает возможность организовать ступенчатую характеристику впрыскивания топлива, параметры которой можно изменять в широких пределах.

Характеристики впрыскивания топлива другого типа могут быть получены, если перекрыть перепускной клапан 5. В этом случае, изменяя начальное давление управляющей жидкости и ее объем, можно получить различные законы подъема иглы и тем самым различные характеристики впрыскивания.

Для определения давления начала открытия перепускного клапана можно написать следующее уравнение:

$$p_{\text{откр}} = \frac{f_u \cdot y}{\alpha (V_{\text{зап}} - f_u \cdot y)} + p_{\text{зап}}$$

где  $p_{\text{зап}}$  – начальное давление управляющей жидкости;

$V_{\text{зап}}$  – объем гидроуправляющей полости;

$f_u$  – площадь поперечного сечения иглы форсунки;

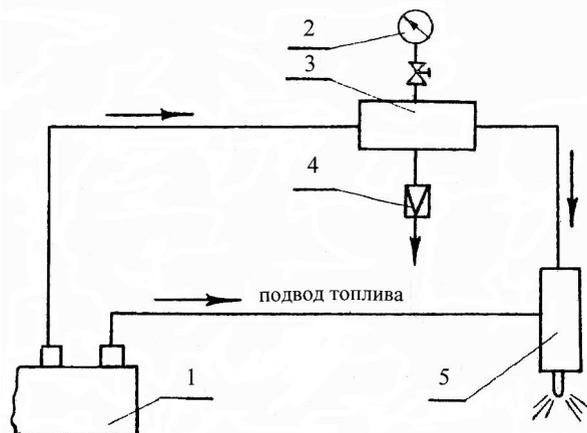
$y$  – подъем иглы форсунки;

$\alpha$  – коэффициент сжимаемости управляющей жидкости в объеме гидроуправляющей полости.

Объем гидроуправляющей полости  $V_{\text{зап}}$  подбирается как можно меньшим (в данном случае  $V_{\text{зап}} = 0,4 \text{ см}^3$ ).

Экспериментальное исследование опытной форсунки проводилось на безмоторном стенде с приводом топливного насоса дизеля ЧН25/34 от электродвигателя постоянного тока. Принципиальная схема системы гидравлического управления приведена на рис.2.

**ДИЗЕЛЬНАЯ ФОРСУНКА  
С УПРАВЛЯЕМЫМ ВПРЫСКИВАНИЕМ ТОПЛИВА**



*Рис. 2. Принципиальная схема системы гидравлического управления работой форсунки:  
1 – топливный насос высокого давления; 2 – манометр;  
3 – гидроаккумулятор; 4 – перепускной клапан; 5 – форсунка*

Жидкость (в данном случае дизельное топливо) от топливного насоса высокого давления 1 подается через гидроаккумулятор 3 к форсунке 5. Для поддержания постоянного давления управляющей жидкости и для наблюдения за его изменением к гидроаккумулятору присоединяются перепускной клапан 4 и манометр 2. Гидроаккумулятор располагается ближе к форсунке. Характеристики впрыскивания определялись путем осциллографирования давления перед распыливающими отверстиями распылителя.

На рис.3 приведены дифференциальные и интегральные характеристики подачи топлива, снятые путем осциллографирования давления перед распыливающими отверстиями распылителя.

Проведенная работа дает основание сделать следующие **выводы**.

1. Способ работы опытной форсунки позволяет замедлить ход иглы распылителя в начальной фазе впрыскивания топлива с последующим ее быстрым подъемом, что обеспечивает подачу в цилиндр меньшего количества топлива за период задержки самовоспламенения, а это должно способствовать снижению жесткости работы дизеля. Такое движение иглы достигается вследствие малой величины объема гидроуправляющей полости над верхним торцом иглы распылителя и наличием перепускного клапана, который обеспечивает перепуск жидкости в заданный момент впрыскивания топлива.

ДИЗЕЛЬНАЯ ФОРСУНКА  
С УПРАВЛЯЕМЫМ ВПРЫСКИВАНИЕМ ТОПЛИВА

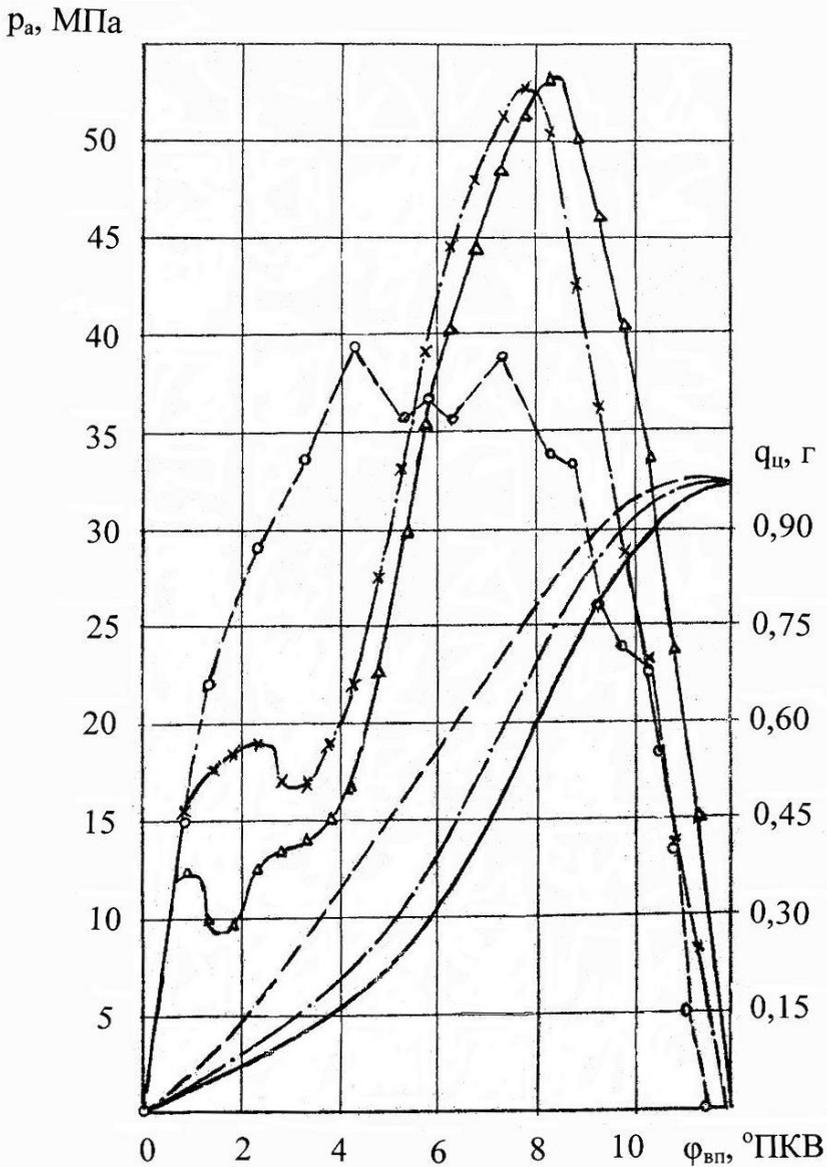


Рис. 3. Характеристики впрыскивания топлива и их интегральные кривые, полученные на штатной и опытной форсунках ( $n = 225 \text{ мин}^{-1}$ ;  $q_{ц} = 1,0 \text{ г}$ )

- штатная,  $p_{\text{фо}} = 25 \text{ МПа}$ ;
- ×— опытная,  $p_{\text{зап}} = 18,5 \text{ МПа}$ ;  $p_{\text{откр}} = 28 \text{ МПа}$ ;
- △— опытная,  $p_{\text{зап}} = 24,5 \text{ МПа}$ ;  $p_{\text{откр}} = 36,5 \text{ МПа}$

**ДИЗЕЛЬНАЯ ФОРСУНКА  
С УПРАВЛЯЕМЫМ ВПРЫСКИВАНИЕМ ТОПЛИВА**

---

---

2. С увеличением частоты вращения кулачкового вала формирование ступеньки происходит при большем ходе иглы распылителя (т.е. положение ступеньки выше, чем при меньшей частоте вращения вала) из-за запаздывания закрытия обратного клапана.

3. Простота способа получения различных законов подачи топлива позволяет использовать его в любых условиях с использованием деталей штатной форсунки.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Астахов И.В. Закон подачи топлива как фактор повышения надежности работы и ресурса быстроходного дизеля // Энергомашиностроение. – 1956. – № 8. – С. 21-24.
2. Ховах М.С., Трусов В.И. Системы питания автомобильных дизельных двигателей. – М.: Транспорт, 1967. – 138 с.

*Надійшла 19.05.2011*

**Рецензент** – докт. техн. наук, доцент кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація флоту» Одеського національного морського університету **Р.А. Варбанець.**

**СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ  
СОГЛАСНО ЖИЗНЕННОМУ ЦИКЛУ СУДОХОДНОЙ КОМПАНИИ**

---

*В работе рассмотрена связь между стадиями жизненного цикла судоходной компании, стратегиями и проектами развития.*

*У роботі розглянуто зв'язок між стадіями життєвого циклу судноплавної компанії, стратегіями та проектами розвитку.*

*Connection is considered between the stages of life cycle of shipping company, strategies and projects of development.*

**Ключевые слова:** *жизненный цикл компании, стадия жизненного цикла, стратегия развития, проект*

**Актуальность темы.** В настоящий момент отсутствуют исследования, направленные на изучение связи жизненных циклов (ЖЦ) и стратегий судоходных компаний. Вопрос о том, каким образом определять стадию ЖЦ для анализа деятельности судоходных компаний, так и остается открытым. Если обобщить многообразие подходов к количеству и названию стадий, то в целом в ЖЦ организации можно выделить четыре основные стадии развития: стадию становления, стадию роста, стадию зрелости и стадию упадка, которая может перейти в стадию обновления. Биологическая теория жизненного цикла говорит о том, что рано или поздно у любого биологического объекта наступит смерть, чего нельзя сказать об организации, так как есть примеры, когда «умирающие» организации возрождались и (или) принимали другие формы, начинали новую жизнь после изменений, например, после реструктуризации.

**Постановка проблемы.** На наш взгляд, концепция ЖЦ позволяет разработать оптимальный способ управления компанией на той или иной стадии ее развития, своевременно выделить альтернативные стратегии в соответствии с динамикой развития во времени. Именно поэтому дополнительные исследования могут в значительной степени усовершенствовать применяющиеся в настоящее время методы.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В [1] исследователи выделили основные критерии, по которым можно определить, на какой стадии развития находится организация (табл. 1).

Сами исследователи отмечают, что не рассматривается продолжительность прохождения организациями каждой стадии и соотношение стадии развития с возрастом их организации.

Если обратиться к обзору украинских судоходных компаний (СК), то следует отметить, что все они были созданы после распада СССР, т.е. максимальный возраст компаний не может быть более 20 лет, например:

– СК «Укрречфлот» была основана в 1992 году, возраст – 19 лет; состав компании – 6876 человек, мощность флота составляла 150 судов;

**СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ  
СОГЛАСНО ЖИЗНЕННОМУ ЦИКЛУ СУДОХОДНОЙ КОМПАНИИ**

Таблица 1

*Критерии определения стадий развития организации*

Фаза развития	Критерии
Рождение	Возраст организации составляет до 10 лет, организация имеет неформальную структуру, во главе управления - менеджер-собственник
Развитие	Уровень продаж возрастает более чем на 15%, функционально организованная структура, политика формализована
Зрелость	Уровень продаж растет, но прирост составляет менее 15%, более бюрократическая организация
Расцвет	Уровень продаж снова возрастает более чем на 15%, используются сложные системы контроля и планирования
Спад	Ограничение выпуска продукции, прибыль падает

– 24.01.2003 года флот Азовского морского пароходства был передан в аренду ООО «Торговый Флот Донбасса» в его составе находилось 33 судна, возрастом 26-28 лет. Следует отметить, что специалистов в Азовском морском пароходстве на 24.09.1991 года насчитывалось около 25 000 чел., а транспортного флота – 146 ед.;

– СК «Укрферри» была основана в октябре 1995 года, т.е. возраст компании 16 лет и в ее составе работают 1300 человек.

Судоходство является высоко циклической отраслью, чувствительной к состоянию мировой торговли и непредсказуемым событиям. Первый крупный кризис после 2-й мировой войны произошел вслед за нефтяным кризисом 1973 г., а последний – мировой кризис 2008 г. – сопровождался обвалом фрахтовых ставок и снижением рыночных стоимостей на суда. Таким образом, судоходная компания, успешно работающая на протяжении 10 лет, и прошедшая мировой кризис 2008 г., не может находиться на стадии ЖЦ – «рождение». В свою очередь, высокая степень динамизма судоходства выражается в быстрых темпах научно-технического развития.

Основная проблема, стоящая перед судоходными компаниями – поддержание технических средств на мировом уровне. Все это требует значительных капиталовложений. Ежегодные капиталовложения в области судоходства в периоды подъема 1980 гг. составляли около 20 млрд. долл. [2. С.43], а на конец 1993 г. стоимость активов в судоходстве достигла 200 трлн. долл. США [3. С.53]. В 1996 г. стоимость активов оценена в 286 трлн. долл. США, в том числе 94 трлн. долл. долга, 83 трлн. долл. государственного капитала, 50 трлн. долл. публичных компаний, 30 трлн. долл. государственного капитала и др. Если обратиться к примеру от-

## СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ СОГЛАСНО ЖИЗНЕННОМУ ЦИКЛУ СУДОХОДНОЙ КОМПАНИИ

---

дельных стран, то рыночная стоимость норвежского флота равна 17,5 млрд. долл., а потребность в капиталовложениях на его развитие в 1997-2006 гг. составила около 8 млрд. долл. [3].

В прошлые годы объем сделок по новым судам превышал 10 млрд. долл. в год, а по подержанным судам – 7 млрд. долл. в год. В 90-х гг. суммарные затраты на строительство нового флота составляли 150-200 млрд. долл. Эти цифры свидетельствуют, что несмотря на различные проблемы ежегодно расходуются внушительные суммы на строительство судов. Быстрому развитию судоходства способствует и тот факт, что морской транспорт является самым массовым и дешевым видом транспорта.

**Цель данной работы** – установить связь между отдельными стадиями ЖЦ судоходных компаний, стратегиями и проектами развития, выявить проблемы для определения стадии ЖЦ.

**Основной материал.** Рассматривая специальную литературу по проблематике жизненного цикла организации, были выявлены трудности для определения стадии жизненного цикла компании.

Во-первых, сложность при оценке компании (или бизнеса) будет состоять в том, сколько лет компания уже существует на рынке. В каждой отрасли этот срок будет различным для определения, например, «зрелой» компании.

Во-вторых, сложность возникает, если в хозяйственном «портфеле» компании содержится несколько новых бизнес-единиц или бизнес-направлений, находящихся на разных этапах ЖЦ. На наш взгляд, для определения стадии ЖЦ компании необходимо выявлять стадии отдельных бизнес-направлений, что позволит выявить существующие проблемы сегодня и найти возможные стратегии развития, а также определить возможные тенденции дальнейшего развития компании и заблаговременно принять меры, чтобы сгладить проблемы в будущем.

В-третьих, сложности при определении стадии ЖЦ компании могут состоять в следующем: возможно, что от начала основания до сегодняшнего дня бизнес (или компания) уже пережил:

- 1) несколько проектов реструктуризации;
- 2) разделение на несколько компаний;
- 3) принятие разных стратегий для разных бизнес-единиц или направлений;
- 4) изменения принципов взаимоотношений с клиентами, корпоративной культуры и т.д.;
- 5) у бизнес-единиц могло быть разное поведение на рынке и различные партнерские отношения.

Тем не менее, важно попытаться разделить весь пройденный компанией путь на несколько этапов, периодов (как для компании в целом, так и для ее бизнес-направлений) и разложить их отдельно на кривой жизненного цикла организации.

## СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ СОГЛАСНО ЖИЗНЕННОМУ ЦИКЛУ СУДОХОДНОЙ КОМПАНИИ

---

Различные стадии ЖЦ организации предъявляют специфические требования к стратегии организации и накладывают определенные ограничения на возможности ее обеспечения, поэтому определение стратегии организации должно учитывать стадию ЖЦ.

Внешняя среда организации, макроэкономические условия и, прежде всего, особенности стадий экономического цикла оказывают влияние на общее состояние и развитие организации. Это предъявляет особые требования к адаптационным возможностям организации и должно учитываться в определении ее стратегии.

В соответствии с распространенным подходом все организации проходят в своем развитии несколько стадий. Это стадии вхождения на рынок, роста, зрелости, спада. Заметим, что все эти стадии жизни организации отличаются друг от друга ключевыми характеристиками деятельности: объем реализуемой продукции, прибыль, клиентская база, уровень издержек и т.д. Таким образом, цели и стратегии организации, находящейся, например, на стадии вхождения в рынок, будут радикальным образом отличаться от таких же характеристик на этапе зрелости. Очевидно, в цикле деловой активности организации выделяются четыре четко различимые фазы: подъем, пик, спад, низшая точка. В таких моментах следует предусматривать различные сценарии развития. В табл. 2 представлены альтернативные стратегии согласно стадиям ЖЦ по И. Адизесу [4]. Охарактеризуем некоторые из них: стадия быстрого роста «давай-давай» – возможности развития бизнеса являются высшими приоритетами; ориентация на увеличения объема перевозок, исключительно быстрый рост. Стадия расцвета – ориентация на результаты (организация удовлетворяет нужды клиентов). Эта стадия характеризуется следующим: организация разрабатывает планы и следует им; *предсказуемость* организации проявляется в ее деятельности; организация может позволить себе как увеличение объемов производства, так и повышение прибыльности; организация порождает новые компании. Стадия аристократизма – средства расходуются на системы контроля, дополнительные выплаты и обустройство. При этом акцент делается на том, *как* делать что-либо, а не на том, что делать и *зачем*. Организация обладает значительными оборотными средствами, становясь привлекательным объектом для поглощения. Стадия ранней бюрократизации – акцент делается на то, *кто* является источником проблем, а не на то, *что* нужно предпринять; процветают конфликты, выяснение отношений и внутренняя борьба.

Наличие стратегии развития является неотъемлемой частью эффективного функционирования всякого предприятия, многие из которых уже осознали важность методологий стратегического управления и управления проектами. Особое значение приобретает разработка обоснованных стратегий развития судоходных компаний, и на их основе – подготовка и реализация отдельных проектов, с учетом стадии ЖЦ, на кото-

**СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ  
СОГЛАСНО ЖИЗНЕННОМУ ЦИКЛУ СУДОХОДНОЙ КОМПАНИИ**

Таблица 2

*Стратегии компании в соответствии со стадиями ЖЦ*

Стадия ЖЦ компании	Возможная стратегия	Конкурентные ходы
Зарождение	Инвестиционная	- необходимы инвестиции для преодоления вхождения в отрасль; - обоснование для потенциальных инвесторов и участников проекта целесообразности вложения их капиталов.
Детство	Маркетинговая	- комплексное изучение рынка; выявление потенциального спроса.
	Производственная	- создается новое предприятие (производство); - планирование предлагаемых услуг (товаров) и цен.
	Стратегия фокусирования	- выделение своей рыночной ниши вследствие недостатка ресурсов.
Давай-Давай	Маркетинговая	- организация материально-технического снабжения; - система формирования спроса на предлагаемую услугу (товар) и стимулирование сбыта.
	Диверсификация	- процесс проникновения в другие отрасли производства.
Зрелость	Дифференциация	- выход на рынок с услугой (товаром), отличающейся от стандартного.
	Диверсификация	- выход на другие сегменты рынка; повышение интенсивности продаж, завоевание новых потребителей.
Расцвет	Лидерство в издержках	- совершенствование структуры затрат; снижение постоянных и переменных расходов; - рост прибыли за счет низких издержек.
	Интеграция	- завоевание слабых конкурентов.
	Дифференциация	- предоставление повышенного качества или особых характеристик товара либо услуги; - модернизация и усовершенствование услуги (продукции).
	Диверсификация	- расширение сферы деятельности; определение приоритетных направлений деятельности и освоение инноваций.

**СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ  
СОГЛАСНО ЖИЗНЕННОМУ ЦИКЛУ СУДОХОДНОЙ КОМПАНИИ**

*Продолжение табл.2*

Стабильность	Внешнеэкономическая	- выход на международный рынок с целью привлечения зарубежного капитала; - поиск стратегических партнеров.
	«Ничего не делать»	- зафиксировать все как есть.
Аристократизм	Дифференциация	- акцент в деятельности компании переносится на то, «как» делается что-либо, потеря рыночных позиций.
	Интеграция, синергизм	- поскольку компания обладает значительными ресурсами, то может приобрести компанию-поставщика либо конкурента.
	Удержания	- снижение цен и затрат, поиск новых рынков сбыта, реструктуризация.
Ранняя бюрократизация	Сокращение	- отсутствие роста и объема продаж, прибыльности; - снижение цен и активизация маркетинговых сил с целью продолжения ЖЦ.
	«Сбор урожая»	- прекращение какого-либо инвестирования и получение максимальной прибыли от продажи продукции.
	Изъятие вложений	- продажа части предприятия.
Бюрократизация и смерть	Изъятие вложений, ликвидация	- продажа предприятия целиком либо по частям.

рой находится компания. Такая необходимость реализуется с помощью формализованных методов для выбора проектов, наиболее отвечающих стратегии развития предприятия и стадии его ЖЦ. Для отбора проектов развития судовой компании необходим метод, позволяющий дать как количественную, так и качественную оценку такому соответствию. Подобным требованиям отвечает аппарат нечетких множеств [5].

Пусть  $E$  – множество и  $x$  – элемент  $E$ . Тогда нечеткое подмножество  $\tilde{A}$  множества  $E$  определяется как множество упорядоченных пар  $\{(x, \mu_A(x))\}, \forall x \in E$ , где  $\mu_A(x)$  – характеристическая функция принадлежности, принимающая степень принадлежности во вполне упорядоченном множестве  $M$ , указывающая степень принадлежности элемента  $x$  подмножеству  $A$ . Множество  $M$  называется множеством принадлежностей [6,7].

При реализации проектов развития, с учетом вышеупомянутых параметров, теория нечетких множеств применяется с тем, чтобы сопоставить матрицы характеристик проектов развития судовой компании в

**СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ  
СОГЛАСНО ЖИЗНЕННОМУ ЦИКЛУ СУДОХОДНОЙ КОМПАНИИ**

соответствии с ее возможными стратегиями и найти наилучший проект, который может быть реализован на данном этапе ЖЦ компании.

Обозначим:  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  – множество проектов развития судоходной компании, которые рассмотрены в [8];

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_p\}$  – множество стадий ЖЦ судоходной компании;

$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$  – множество возможных стратегий судоходной компании.

Пусть  $\xi_R : X \times Y [0;1]$  – функция принадлежности бинарного отношения  $R$ , определяемая с помощью эксперта. Отношение  $R$  представляется в матричной форме следующим образом:

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} y_1 & y_2 & \dots & y_p \end{matrix} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{matrix} & \left[ \begin{array}{cccc} \xi_R(x_1; y_1) & \xi_R(x_1; y_2) & \dots & \xi_R(x_1; y_p) \\ \xi_R(x_2; y_1) & \xi_R(x_2; y_2) & \dots & \xi_R(x_2; y_p) \\ \xi_R(x_n; y_1) & \xi_R(x_n; y_2) & \dots & \xi_R(x_n; y_p) \end{array} \right] \end{matrix}.$$

В этой матрице элементы каждой строки выражают оценку соответствия проекта развития в соответствии с этапом ЖЦ компании.

Пусть  $\psi_s : Y \times Z [0;1]$  – функция принадлежности бинарного отношения  $S$ . Для всех  $y \in Y$ , и всех  $z \in Z$ ,  $\psi_s(y; z)$  равна степени важности стадии ЖЦ компании для реализации стратегии развития. Чем выше значение функции, тем вероятнее стратегия будет успешно реализована на данном этапе ЖЦ. В матричной форме это отношение имеет вид

$$S = \begin{matrix} & \begin{matrix} z_1 & z_2 & \dots & z_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_p \end{matrix} & \left[ \begin{array}{cccc} \psi_s(y_1; z_1) & \psi_s(y_1; z_2) & \dots & \psi_s(y_1; z_m) \\ \psi_s(y_2; z_1) & \psi_s(y_2; z_2) & \dots & \psi_s(y_2; z_m) \\ \psi_s(y_p; z_1) & \psi_s(y_p; z_2) & \dots & \psi_s(y_p; z_m) \end{array} \right] \end{matrix}.$$

Значения матрицы  $S$  отражают степень соответствия стадий ЖЦ  $Y_i$  судоходной компании при принятии компанией соответствующей стратегии развития  $z_j$ .

Из матриц  $R$  и  $S$  получаем матрицу  $T$

**СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ  
СОГЛАСНО ЖИЗНЕННОМУ ЦИКЛУ СУДОХОДНОЙ КОМПАНИИ**

$$T = \begin{matrix} & \begin{matrix} z_1 & z_2 & \dots & z_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{matrix} & \left[ \begin{matrix} \mu_A(x_1; z_1) & \mu_A(x_1; z_2) & \dots & \mu_A(x_1; z_m) \\ \mu_A(x_2; z_1) & \mu_A(x_2; z_2) & \dots & \mu_A(x_2; z_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_A(x_n; z_1) & \mu_A(x_n; z_2) & \dots & \mu_A(x_n; z_m) \end{matrix} \right] \end{matrix},$$

элементы которой определяются функцией принадлежности

$$\mu_A(x, z_i) = \frac{\sum_y \xi_R(x, y) \cdot \psi_S(y, z)}{\sum_y \psi_S(y, z)}, \text{ для всех } x \in X, y \in Y, z \in Z.$$

Это и есть интегрированная оценка, которая присваивается проекту по всем параметрам и сравнивается с другими оценками остальных проектов развития. Таким образом, мы получаем меру соответствия этапа ЖЦ судоходной компании реализации стратегии через проект развития. Т.е. проекты, чьи функции принадлежности оказались самыми высокими, отбираются в портфель. Другой способ – заранее установить так называемый «порог», ниже которого, какая бы оценка ни была, проект не принимается.

**Выводы.** Рассмотрение основных стадий ЖЦ судоходных компаний и стратегий приводит к следующему выводу.

Выявлено, что за каждой стадией ЖЦ можно закрепить конкретные стратегии развития судоходной компании. В зависимости от того, какие цели преследует руководство, различными будут стратегии дальнейшего развития, реализуемые через отдельные проекты. Анализируя стадии ЖЦ компании, сформирован ряд стратегических альтернатив ее деятельности. Исходя из того, какую стратегию развития ставит перед собой компания, таким будет основной перечень проектов, имеющих наибольшую ценность для компании.

Сложность при оценке соответствия компании (или отдельного бизнеса) определенной стадии ЖЦ будет состоять в том, что размер и возраст компании, количество сотрудников, генерируемый доход и другие параметры будут различными для определения, например, «зрелой» компании разной специализации. Кроме того, важно помнить, что размер компании (как по количеству работающего персонала, так и по генерируемому доходу) будет по-разному определяться для различных отраслей (консалтинговая компания с количеством сотрудников 500 человек вряд ли будет считаться малой или даже средней, тогда как для промышленной отрасли такая компания явно небольшая). На сегодняшний день к среднему бизнесу принято относить компании с годовым оборотом от 8 до 25 млн. евро – для таких секторов экономики, как оптовая и розничная торговля, производство, сфера услуг (кроме финансовых). Очевидно, что большинство украинских компаний относится к малому и среднему бизнесу.

**СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ  
СОГЛАСНО ЖИЗНЕННОМУ ЦИКЛУ СУДОХОДНОЙ КОМПАНИИ**

---

---

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Креативные технологии управления проектами и программами: Монография/ С.Д. Бушуев, Н.С. Бушуева, И.А. Бабаев, В.Б. Яковенко, Гриша Е.В., С.В. Дзюба, А.С. Войтенко. – К.: Саммит-Книга, 2010. – 768 с.*
2. *Любимов Л.Л., Могилевкин И.М., Горелик Н.А. Проблемы развития морского судоходства. – М.: Наука, 1983. – 248 с.*
3. *Вензик Н. Г., Левиков Г. А. Повышение конкурентоспособности судоходных компаний. – М.: Транспорт, 2001. – 215 с.*
4. *Adizes I. Corporate Lifecycles: How and Why Corporations Grow and Die and What to Do about It. Prentice Hall: Englewood Cliffs, N. J., 1988.*
5. *Семенчук Е.Л. Моделирование деятельности судоходных компаний на основе стратегий развития // Матеріали щорічної науково-практичної конференції „Економічні та фінансові процеси в умовах прогнозової невизначеності: регіональний аспект”. – Одеса: ОРІДУ НАДУ, 2010. – С. 89-91.*
6. *Баканов М.И., Шеремет А.Д. Теория экономического анализа. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 416 с.*
7. *Лапкина И.А., Павловская Л.А., Болдырева Т.В., Шутенко Т.Н. Проектный анализ: теоретические основы оценки проектов на морском транспорте: Учебн. пособие. – Одесса: Феникс, 2008. – 416 с.*
8. *Семенчук Е.Л. Проекты развития предприятия //Вісник Одеського національного морського університету// Зб. наук. праць. – Вип. 31. – Одеса: ОНМУ, 2010. – С. 197-206.*

*Надійшла 28.03.2011*

**Рецензент** – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри «Системний аналіз і логістика» Одеського національного морського університету **І.О. Лапкина**.

**ОСОБЕННОСТИ  
ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТАМ**

---

---

*Представлен взгляд на проект с позиций системного подхода как к сложной открытой динамической стационарной системе надбиологического уровня организации. Выявлены общесистемные свойства проекта, особенности процесса развития проекта.*

*Представлено погляд на проект з позицій системного підходу як до складної відкритої динамічної стаціонарної системи надбіологічного рівня організації. Виявлено загальносистемні властивості проекту, особливості процесу розвитку проекту.*

*The sight on project from positions of the system approach as to complex open dynamic stationary system above biological organisation level is presented. Are revealed general system properties of the project, feature of development of the project.*

**Ключевые слова.** Системный подход, сложная открытая динамическая стационарная система, материальный, энергетический, информационный потенциал проекта, метаболизм, гомеостаз, развитие.

**Постановка проблемы в общем виде.** Для повышения результативности инвестиционной деятельности в различных отраслях в последнее время особенно актуальным становится применение методологии управления проектами путем рассмотрения аспектов целесообразности капиталовложений сквозь призму инструментария проектного менеджмента. Методология управления проектами использует ряд подходов к проекту, в том числе *системный, процессный, проектный и сценарный*. *Системный подход* характеризуется обобщенным взглядом на проект как на системную единицу и гармонично вписывается в общую методологию управления проектами.

**Анализ последних исследований и публикаций, выделение нерешенной части общей проблемы.** Исследованию систем посвящено немало научных работ [1-6], авторы которых предлагают различные варианты трактовки понятия «система», в той или иной мере отражающие универсальность понятия. Рассматривается проект с позиций системного подхода в работах С.Д. Бушуева, Н.С. Бушуевой [7, 8], В.А. Рача [9], Г.С. Махуренко [10] и др.

С позиций системного подхода проект должен обладать следующими характеристиками:

1. Состоять из элементов (подсистем) внутренней среды, взаимосвязанных и взаимозависимых. При этом выделяют ресурсы, участников, команду проекта, процессы и области управления проектами.

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТАМ

---

2. Обладать структурой – организацией связей и отношений между элементами проекта. В качестве структур проекта можно представить дерево целей, *OBS*-структуру, *WBS*-структуру, матрицу ответственности, сетевой график и др.

3. Взаимодействовать с внешней средой – внешними условиями, которые влияют на осуществление проекта. К числу основных внешних относятся политические, экономические, социальные, научно-технические, климатические, административные условия.

4. Обладать свойством эмерджентности. Данное свойство проекта подтверждается способностью синтезировать результат – продукты проекта.

Выделение внутренней и внешней среды проекта зависит от выбора степени обособленности системы «проект». Все элементы, которые входят в эту систему, формируют внутреннюю среду – проектный потенциал. Все, что лежит вне этой обособленной системы, рассматривается как внешняя среда – проектное окружение.

Классическое определение потенциала дано в [11]: «потенциал (от лат. *potentia* – сила) – источники, возможности, средства, запасы, которые могут быть использованы для решения какой-либо задачи, достижения определенной цели».

Учитывая множество элементов проектного потенциала системы, выполняющих различные функции, многообразие связей между элементами, а также их связей с элементами окружения проекта, и способность изменяться на протяжении жизненного цикла, проект следует считать *сложной открытой динамической системой*. Открытость системы означает, что система осуществляет обмен веществом, энергией и информацией с внешней средой. Вещественно-энергетически-информационный обмен системы с внешней средой, а также отдельных элементов системы между собой называется метаболизмом. *Метаболизм* (от греч. «*метаболе*» – перемена, превращение [12]) обеспечивает возможность существования системы за счет привлечения извне жизненно необходимых субстанций и возврата во внешнюю среду результатов и отходов деятельности системы. Кроме того, внутри системы также происходит преобразование вещества, энергии и информации. Явление метаболизма изначально исследовалось как свойство живых систем, но все больше ученых приходят к заключению о единообразии процессов, происходящих в системах различных уровней организации (добиологического, биологического и надбиологического). Проведена аналогия проекта с биологическими системами в работах С.Д. Бушуева, Н.С. Бушуевой [8], Б.Б. Стелюк [13], И.А. Бабаева [14].

**Целью статьи** является представление проекта как сложной системы надбиологического уровня организации и выявление особенностей применения системного подхода к проектам.

**ОСОБЕННОСТИ  
ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТАМ**

---

**Изложение основного материала.** Материя, энергия, информация – категории, обуславливающие возможность существования различных уровней иерархии мироздания. Из вышеприведенных определений видно, что все три понятия взаимосвязаны и взаимозависимы. Они не могут существовать по отдельности. Другими словами, энергия является той причиной, которая по определенной информационной программе трансформирует одну форму материи (в частности, вещество) в другую, изменяя ее пространственно-временные характеристики.

Проектный потенциал условно можно разделить на материальную, информационную и энергетическую составляющие:

✓ *материальный потенциал проекта* – совокупность объединенных в системное целое материальных элементов, позволяющих осуществлять комплекс функций, необходимых для существования и развития проекта;

✓ *информационный потенциал проекта* – нематериальная основа, связывающая в системное целое материальные элементы проекта и обеспечивающая его упорядоченность в пространстве и времени;

✓ *энергетический потенциал проекта* – совокупность энергетических центров проекта (инициатор, команда, участники проекта) [15], энергия которых направлена на достижение целей проекта (рис.1) [16].



*Рис.1. Состав проектного потенциала*

Реализация проекта возможна лишь при слаженном взаимодействии трех составляющих проектного потенциала. Материальный потенциал так и останется лишь потенциалом без целенаправленного энергетического воздействия на него со стороны энергетических центров, в основе которого находится информационная программа проекта. Целенаправленное энергетическое воздействие невозможно без материального воплощения источника воздействия (управленческих ресурсов), действующего по заданной информационной программе проекта. А информацион-

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТАМ

ный потенциал не реализуется без энергии целенаправленной деятельности, использующей материальный потенциал.

Таким образом, можно утверждать, что проекту как открытой сложной системе, относящейся к надбиологическому уровню организации, свойственен метаболизм, который характеризуется обменом материей (финансовые, материальные, технические, технологические, трудовые, управленческие ресурсы), информацией (информационные ресурсы), энергией (управленческие, трудовые ресурсы). Невозможно произвести четкое разделение ресурсов на категории, так как многие из них выполняют несколько функций. Например, управленческие ресурсы – это люди (материальная основа), их знания и навыки (информационная основа), и творческий потенциал (энергия).

Ресурсы поступают в проект из проектного окружения на входе в систему управления проектом. На выход поступают результаты – продукты проекта, а также отходы деятельности (например, макет реального объекта, документация проекта и др.) (рис.2).

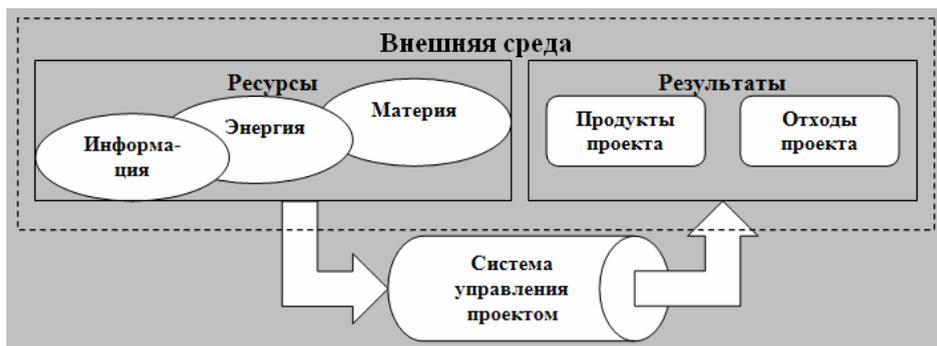


Рис.2. Метаболизм проекта с внешней средой

Таким образом, можно утверждать, что в процессе осуществления метаболизма происходит ресурсный обмен проекта с внешней средой, в результате чего проект существует и изменяет свое состояние. Под *состоянием* системы понимают множество существенных свойств, которыми система обладает в данный момент времени, или упорядоченную совокупность значений внутренних и внешних параметров, определяющих ход процессов, происходящих в системе.

Несмотря на существование множества возможных способов оценки состояния системы «проект» [17-20], все они учитывают отклонения проекта от его *стационарного состояния*, характерного для данного момента времени. Каждому стационарному состоянию соответствуют определенные значения параметров, при которых проект может существовать. Отклонение параметров от оптимальных значений снижает эффективность функционирования системы, а в случае достижения критическо-

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТАМ

---

го уровня приводит к нарушениям в функционировании, вплоть до разрушения системы (в случае с проектом – к его закрытию). Таким образом, для успешного функционирования проект должен являться *стационарной системой*.

Стационарность системы отражает ее способность поддерживать устойчивое динамическое равновесие или динамическое относительное постоянство состава и свойств – *гомеостаз* (от греч. «гомоноис» – подобный, одинаковый и «статис» – неподвижность, состояние) [21, 22]. Состояние гомеостаза обеспечивает оптимальные условия для функционирования системы в пределах зоны допустимых значений ее параметров, т.е. при сохранении определенного *уровня гомеостаза*. Нарушение гомеостаза системы проявляется в разрыве связей между ее элементами и разрушении самих элементов. Поддержание гомеостаза проекта обеспечивается механизмом *отрицательной и положительной обратной связи*.

*Отрицательная обратная связь* является ответной реакцией на внешнее воздействие, направленной на стабилизацию состояния проекта в пределах существующего уровня гомеостаза за счет внутренних резервов. Недостатком отрицательной обратной связи является то, что не всегда система может успеть отреагировать на изменения внешней среды компенсационным механизмом и сохранить свое устойчивое состояние. В таких случаях включается механизм положительной обратной связи.

*Положительная обратная связь* направлена на трансформацию уровня гомеостаза путем изменения параметров проекта в направлении внешнего воздействия. При этом проект адаптируется к произошедшим изменениям путем изменения элементов проектного потенциала и связей между этими элементами. Такой механизм обратной связи позволяет предотвратить разрушение системы «проект» и открывает новые возможности в ее развитии.

Например, в случае уменьшения поступления в проект материальных ресурсов, руководителем проекта может быть принято решение об изменении сроков выполнения работ. Таким способом проект будет пытаться ответить на изменения внешних условий (отрицательная обратная связь). Но также руководство может принять решение о применении новой менее ресурсоемкой технологии выполнения работ, что в конечном результате позволит не только выполнить проект в срок, но и улучшить его временные показатели. Проект, отвечая таким способом на внешние воздействия, выходит на новый качественный уровень (положительная обратная связь). Механизмы действия положительной и отрицательной обратной связи в управлении проектом представлены на рис.3.

Из вышесказанного следует, что проект обладает свойствами, которые позволяют рассматривать его как:

✓ *сложную* (состоит из множества элементов проектного потенциала и связей между ними);

### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТАМ

- ✓ *открытую* (поддерживает вещественно-энергетически-информационное взаимодействие с проектным окружением – метаболизм);
- ✓ *динамическую* (изменяет свое состояние на протяжении жизненного цикла);
- ✓ *стационарную* (поддерживает динамическое относительное постоянство состава и свойств – гомеостаз) *систему надбиологического уровня организации.*

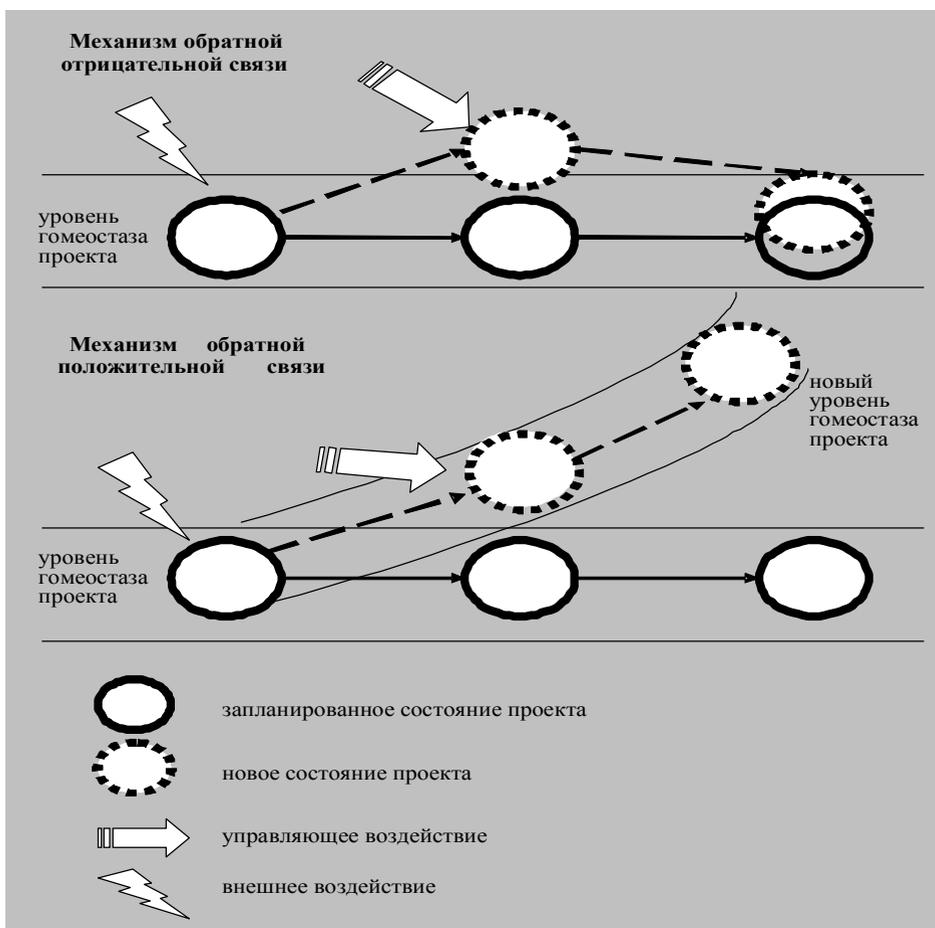


Рис. 3. Механизм обратной связи в системе управления проектом

На протяжении жизненного цикла проект *изменяется*, т.е. переходит из состояния в состояние. Таким способом проект проходит свой жизненный путь, который можно представить в виде цепочки последовательных состояний системы. Каждому состоянию соответствует определенный уровень гомеостаза, характеризующийся некоторыми значениями временных, стоимостных и качественных параметров, обеспеченных ре-

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТАМ

сурсами проекта. При переходе проекта в новое состояние параметры гомеостаза изменяются. В данном случае явно прослеживается аналогия с пакетами работ, формирующимися при структуризации проекта. Для перехода в следующее состояние проекта необходимо выполнить объем работ предшествующего пакета в соответствии с допустимыми значениями параметров, вариация которых возможна в определенных пределах.

Уровень гомеостаза состояния проекта может колебаться в границах определенного диапазона. При этом, если не достигается нижняя граница гомеостаза или превышает верхняя, стационарная система «проект» существовать не может. В первом случае будет наблюдаться недостаток энергии состояния, а во втором – переизбыток. И то и другое губительно для системы. Механизм изменения стационарных состояний проекта заключается в следующем: в период существования стационарного состояния проекта за счет метаболизма идет постепенное накопление энергии, информации и материи до тех пор, пока не будет достигнут определенный уровень гомеостаза. По достижению этого уровня проект готов перейти в новое состояние (рис.4).

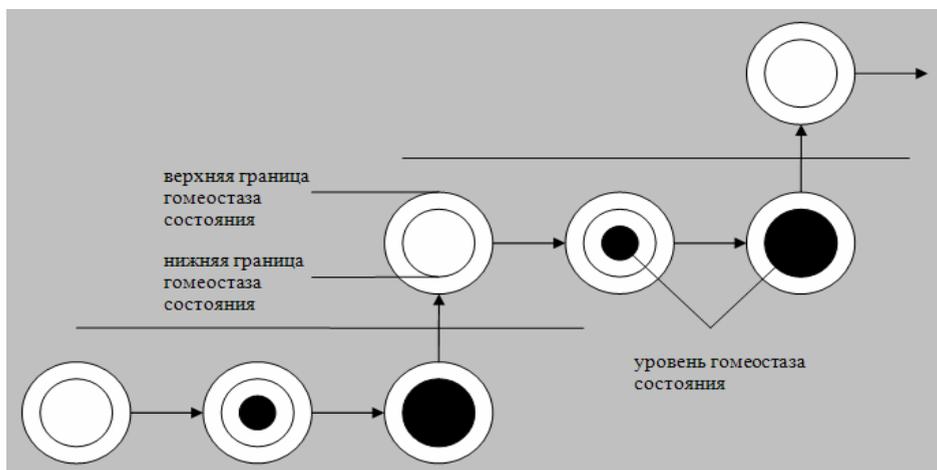


Рис. 4. Механизм изменения стационарных состояний проекта

Процесс изменения состояний проекта характеризуется такими свойствами, как необратимость, направленность, закономерность.

*Необратимость* – свойство процессов протекать в определенном направлении без возможности возврата в исходное состояние. Проект является той системой, которая не может вернуться в исходное состояние без приложения определенных усилий (выполнения дополнительных работ) и изменения своего жизненного пути. Проект несимметричен и нецикличесок по времени и в каждый момент времени находится на определенном этапе жизненного цикла.

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТАМ

---

*Направленность* предполагает возможность системы изменяться в определенном направлении. Направленность изменений проекта вытекает из его определения: «проект – некоторая задача с определенными исходными данными и требуемыми результатами (целями), обуславливающими способ ее решения» [23]. Именно целеполагание проекта определяет направление изменения его состояний на протяжении жизненного цикла.

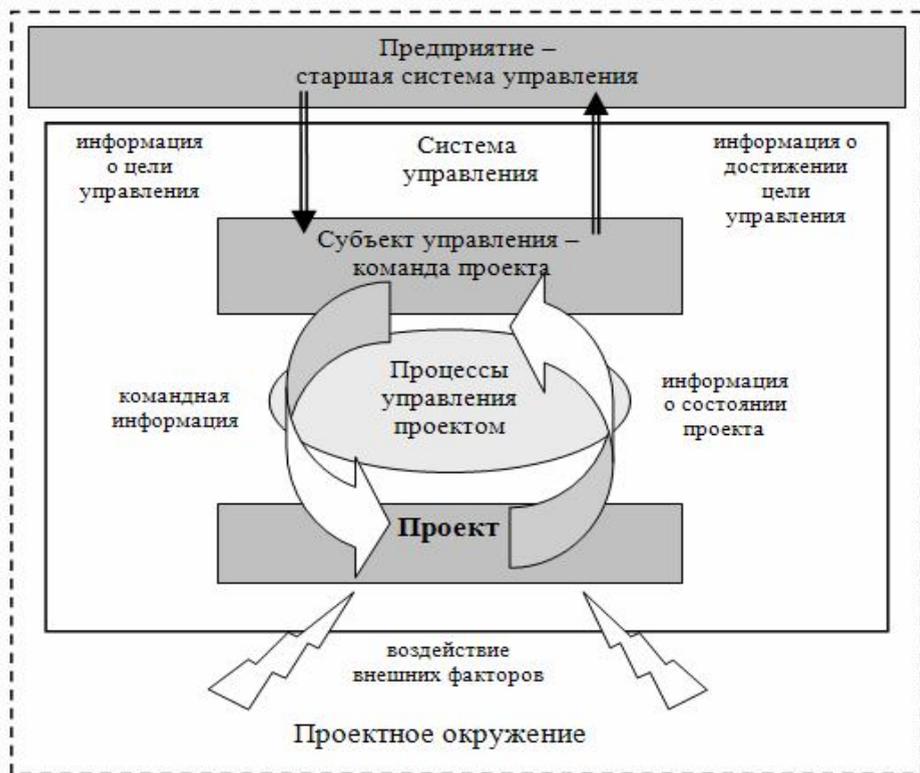
*Закономерность* – свойство системы изменяться в соответствии с определенными законами. Закономерность изменений проекта прослеживается в действии закона причинно-следственных связей, когда при одинаковых начальных условиях, одинаковых условиях осуществления и одинаковом развитии событий достигается одинаковый результат. Наличие закономерностей позволяет делать предположения о будущей результативности проекта.

Таким образом, процесс изменения состояний проекта является *развитием* проекта. Данное утверждение вытекает из определения развития как необратимого, направленного, закономерного изменения материальных и идеальных систем [24]. Поскольку развитие проекта является целенаправленным изменением, для его осуществления необходимо выполнение процессов управления проектом как сложной кибернетической системой. В результате объединения элементов системы управления проектом образуется контур управления, в котором циркулируют потоки информации между субъектом и объектом управления. Контур управления проектом является замкнутым и включает обратную связь. Цель системе управления проектом задается извне – старшей системой управления (например, родительским предприятием).

Таким образом, в системе управления проектом следует выделить такие элементы:

- ✓ объект управления – проект предприятия;
  - ✓ субъект управления – команда проекта;
  - ✓ старшая система управления – предприятие;
  - ✓ прямая связь – управляющее воздействие команды проекта на проект (процессы инициализации, планирования, выполнения, закрытия);
  - ✓ обратная связь – информация о состоянии проекта (процессы контроля, анализа);
  - ✓ возмущающие воздействия – влияние факторов внешней среды;
  - ✓ вход – информация о целях проекта от руководства предприятия;
  - ✓ выход – информация об уровне достижения целей проекта
- (рис. 5).

**ОСОБЕННОСТИ  
ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТАМ**



*Рис. 5. Система управления проектом*

Следовательно, управление проектом представляет собой комплекс управленческих воздействий, обеспечивающих развитие проекта по его жизненному пути. Каждое воздействие должно быть направленным (подчинено общей цели проекта), необратимым (переводить проект в новое состояние) и закономерным (приводить к определенным последствиям).

Осуществление управленческих воздействий, составляющих процесс управления проектом, возможно благодаря использованию проектного потенциала: энергетического, информационного и материального. Управленческое воздействие заключается в передаче системе «проект» определенного энергетического импульса (задания на совершение работы) для ее развития согласно информационной программе (информационной матрице) посредством использования материального потенциала (ресурсов проекта).

Приведенное утверждение не противоречит основным физическим законам изменения состояния систем, поскольку изменить состояние системы возможно, только затрачивая энергию. При этом воздейст-

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТАМ

---

вие на систему, приводящее к изменению ее состояния, осуществляется путем совершения работы.

Работа – это «величина, характеризующая количественные и качественные изменения, которые произошли в системе под действием силы (энергетического воздействия)» [25]. Известно определение понятия «работа» как процесса превращения одного вида энергии в другой [26]. Следовательно, для осуществления работы, как самой системой, так и над системой, необходимо затратить энергию. В результате осуществления работы будет увеличиваться информационная упорядоченность проекта, а, значит, снижаться энтропия. То есть, благодаря осуществлению процесса управления проектом, из разрозненных элементов проектного ресурсного потенциала создается система «проект».

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Предложенный в статье взгляд на проект с позиций системного подхода позволяет представить его в виде сложной открытой динамической стационарной системы надбиологического уровня организации, выявить общесистемные свойства, особенности процесса развития. Рассмотрение проекта в таком ракурсе позволяет в дальнейшем использовать его особенности при применении других управленческих подходов к проекту, в частности, процессного, сценарного, ситуационного, а также современных биологического и генетического подходов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Анфилатов В. С. Системный анализ в управлении: учебн. пособие / В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 368 с.*
2. *Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1978. – 399 с.*
3. *Квейд Э. Анализ сложных систем / Э. Квейд. – М.: Сов. Радио, 1969. – 518 с.*
4. *Калашников В. В. Сложные системы и методы их анализа / В.В. Калашников. – М.: Знание, 1980. – 64 с.*
5. *Шрейдер Ю.А., Шаров А.А. Системы и модели / Ю. А. Шрейдер, А. А. Шаров. – М.: Радио и связь, 1982. – 152 с.*
6. *Месарович М., Такахара Н. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, Н. Такахара. – М.: Мир, 1978. – 311 с.*
7. *Бушуев С.Д. Модели и методы стратегического развития организаций от «видения» к реальности / С.Д. Бушуев, Н.С. Бушуева // Управління проектами та розвиток виробництва. – 2005. – № 4. – С. 5-13.*

**ОСОБЕННОСТИ  
ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТАМ**

---

8. Бушуев С. Д. *Современные подходы к развитию методологии управления проектами* / С. Д. Бушуев, Н. С. Бушуева // *Управління проектами та розвиток виробництва*. – 2005. – № 1. – С. 5-19.
9. Рач В.А. *Принципы системного подхода в проектном менеджменте* // *Управління проектами та розвиток виробництва*. – 2000. – № 1. – С. 7-9.
10. Махуренко Г.С. *Методические основы проектной деятельности* // *Управління проектами та розвиток виробництва*. – 2000. – № 1. – С. 98-108.
11. *Советский энциклопедический словарь* / [гл. ред. А.М. Прохоров]. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – 1632 с.
12. *Словник інішомовних слів* / [ред. О. С. Мельничук]. – К.: Головна редакція української радянської енциклопедії, 1977. – 776 с.
13. Стелюк Б.Б. *Применение биологического подхода к развитию организации* // *Управління проектами та розвиток виробництва*. – 2004. – № 4. – С. 142-145.
14. Бабаев И. А. *Формирование видения продукта проекта развития организации* / И. А. Бабаев // *Управління проектами та розвиток виробництва*. – 2006. – № 2. – С. 30-38.
15. *Управління програмами організаційного розвитку в конкурентном оточенні: Тези допов. IV міжнар. конф. [«Управління проектами у розвитку суспільства»], (Київ, 2007 р.)* / МОНУ, КНУБА, УАУП, АУП, відп. ред. С. Д. Бушуєв. – К.: КНУБА, 2007. – 174 с.
16. *Управління проектами: стан та перспективи: Тези допов. III міжнар. наук.-практ. конф., (Миколаїв, 2007 р.)* / МОНУ, НУК, АНСУ, УАУП та інші, відп. ред. К. В. Кошкін. – К.: НУК, 2007. – 299 с.
17. Мазур И. И. *Управление проектами: Учебн. пособие для вузов* / И. И. Мазур, В. Д. Шапиро, Н. Г. Ольдерогге. – М.: ЗАО Изд-во «Экономика», 2001. – 574 с.
18. Товб А. С. *Управление проектами: стандарты, методы, опыт* / А. С. Товб, Г. Л. Ципес. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2003. – 240 с.
19. Гречуха Е. И. *К вопросу о разработке бюджетов проектов и программ* / Е. И. Гречуха // *Управління проектами та розвиток виробництва*. – 2003. – № 1. – С. 69-75.
20. Кальниченко Е. В. *Методика освоенного объема как механизм эффективного управления стоимостью проекта* / Е.В. Кальниченко // *Управління проектами та розвиток виробництва*. – 2003. – № 1. – С. 32-38.

**ОСОБЕННОСТИ  
ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТАМ**

---

---

21. Мельник Л. Г. Информационная экономика / Л. Г. Мельник. – Сумы: ИТД «Университетская книга», 2003. – 288 с.
22. Экономика предприятия: Учебн. пособие/ Гл. ред. Л. Г. Мельник. – Сумы: ИТД «Университетская книга», 2003. – 638 с.
23. Лапкина И.А. Управление проектами: Тексты лекций / И.А. Лапкина. – Одесса: ОНМУ, 2002. – 131 с.
24. Большая Советская Энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1975. Т. 21. – 409 с.
25. Мельник Л.Г. Фундаментальные основы развития / Л.Г. Мельник. – Сумы: ИТД «Университетская книга», 2003. – 288 с.
26. Ожегов С.И. Толковый словарь русского языка: Российская академия наук. Институт русского языка им. В.В. Виноградова / С.И. Ожегов, Н.Ю. Шведова. – М.: А ТЕМП, 2004. – 944 с.

*Надійшла 13.03.2011*

**Рецензент** – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри «Системний аналіз і логістика» Одеського національного морського університету **І.О. Лапкина**.

**МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА  
КАК ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ**

---

*Статья посвящена исследованию использования метода функционально-стоимостного анализа в системе организационного проектирования и оптимизации системы управления промышленным предприятием. Рассмотрены вопросы применения функционально-стоимостного анализа при модернизации структуры управления проектно-ориентированных наукоемких предприятий.*

*Статтю присвячено дослідженню використання метода функціонально-вартісного аналізу у системі організаційного проектування та оптимізації системи управління промисловим підприємством. Розглянуто питання використання функціонально-вартісного аналізу при модернізації структури управління проектно-орієнтованих наукоємних підприємств.*

*This article is targeted on research as to use of functional-costal analysis in the system of organizational planning and optimization the system of industrial enterprise management. The questions of the functional-costal analysis application on during modernization of project-orienten enterprises management structure have been considered.*

**Ключевые слова:** функционально-стоимостной анализ, организационное проектирование, система управления промышленным предприятием, оптимизация затрат.

Тенденции мировой экономики требуют пересмотра сформировавшихся концепций совершенствования управления, применения новых методов анализа и построения систем управления предприятием.

Одним из таких методов является функционально-стоимостный анализ (далее – ФСА), который в современных условиях, характеризующихся упрощением систем управления, сокращением численности аппарата управления и уменьшением затрат на его содержание, приобретает большое значение. Поэтому важнейшей предпосылкой широкого применения ФСА в системах управления предприятием является развитие экономических методов управления.

Бурное развитие комплексного организационного проектирования систем управления сопровождалось отработкой арсенала методов совершенствования управления. Не все традиционные организационные методы отвечают требованиям, предъявляемым организационным проектированием. Новый объект проектирования, система управления предприятием, являясь сложной социально-экономической структурой, потребовал создания новых методов, способных проникнуть вглубь явлений, происходящих внутри этой системы и учесть ее сложнейшие взаимосвязи с другими системами.

**МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА  
КАК ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ**

---

Особенную актуальность совершенствование структур управления приобрело после финансово-экономического кризиса 2008 года, последствия которого страна ощущает до сих пор. На этом направлении находится большой потенциал для развития и минимизации затрат, связанных с производством и реализацией продукции, а также минимизация рисков упущенной выгоды в связи с ошибочными управленческими решениями.

**Анализ последних публикаций и исследований.** Метод ФСА был разработан в США и впервые применен в 1947 году в компании General Electric. Инженер Лоуренс Д. Майлс пришел к выводу, что снижение издержек производства надо начинать с анализа потребительских свойств изделия и технических функций составляющих его частей. В центр внимания ставился вопрос, насколько оправданы затраты с точки зрения полученных свойств товара, удовлетворяющих те или иные запросы и потребности. Для получения соответствующих свойств товара необходимы определенные затраты. Поэтому важны пропорции между полезностью отдельных свойств и понесенными затратами. В зарубежной практике используются следующие аналоги ФСА: анализ стоимости (при анализе существующих изделий), инженерно-стоимостный анализ (при проектировании новых изделий) и управление стоимостью [5].

Метод функционально-стоимостного анализа как инструмент совершенствования управления предприятием является относительно новым и почти не освещен в печати. Функционально-стоимостный анализ широко применяется в ряде отраслей машиностроительной промышленности при проектировании и модернизации конструкций изделий, совершенствовании технологических процессов, стандартизации и унификации изделий, организации основного и вспомогательного производства. В последнее время ФСА стали применять при совершенствовании управления.

**Целью статьи** является разработка концептуальных основ использования функционально-стоимостного анализа в качестве инструмента при разработке новых организационных структур промышленного предприятия (на примере наукоемкого предприятия «Зоря»-«Машпроект»).

ФСА системы управления предприятием – это метод технико-экономического исследования функций, направленный на поиск путей совершенствования и резервов снижения затрат на управление на основе выбора экономичных и эффективных способов осуществления функций управления в целях повышения эффективности производства и качества продукции. ФСА системы управления предприятием основывается на принципах системного подхода, функционального подхода, принципе соответствия степени значимости функций затратам и уровню качества их реализации, народнохозяйственного подхода, принципе коллективного творчества.

**МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА  
КАК ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ**

---

Системный подход требует изучения системы управления предприятием как целостного комплекса, состоящего из подсистем и элементов. Этот подход предусматривает рассмотрение связей внутри системы между подсистемами и элементами, между системой управления в целом и производством, которые находятся во взаимодействии, а также внешних связей системы, которая является частью структуры управления более высокого уровня.

Функциональный подход позволяет представлять систему управления как комплекс выполняемых функций [4]. Исследованию подвергаются функции управления, обеспечивающие выработку, обоснование, принятие и реализацию управленческих решений заданного уровня качества для достижения результатов – получения запланированного объема и состава потребительских стоимостей при минимальном уровне общественно необходимых затрат на управление и производство. При изучении функций специалисты полностью абстрагируются от конкретной системы управления, ее оргструктуры и рассматривают только функции и оптимальные способы их выполнения. Главной задачей является не усовершенствование системы управления или оргструктуры, а поиск наилучших способов выполнения функций существующей системой управления. Это дает свободу в нахождении принципиально новых решений, не связанных со старой оргструктурой, или же позволяет предельно упрощать ее так, что при этом не снижается качество выполнения функций.

Принцип соответствия степени значимости функций затратам и уровню качества их реализации заключается в том, что определяются значимость каждой функции системы управления в сравнении с другими функциями, фактические затраты на осуществление этих функций и уровень качества их выполнения. Затем происходит сопоставление значимости функций с затратами на их реализацию и уровнем качества их осуществления. Этот прием позволяет дать экономическую оценку существующей и предлагаемой системе управления.

ФСА системы управления проводится при разработке систем управления вновь строящихся предприятий; при совершенствовании системы управления предприятия в период реконструкции или технического перевооружения; а также с целью совершенствования системы управления предприятием в результате возникновения каких-либо производственных ситуаций (узких мест) [6]. В последнем случае объектом анализа выступает не вся система управления, а отдельная подсистема (производственное или функциональное подразделение).

Целями ФСА системы управления предприятием или отдельной его составной частью является: сокращение затрат на осуществление функций управления при сохранении или повышении уровня их качества и повышение эффективности работы аппарата управления предприятием для достижения наилучших производственных результатов.

**МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА  
КАК ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ**

---

Основные задачи ФСА системы управления – это достижение наилучшего соотношения между эффективностью работы аппарата управления производством и затратами на его содержание; снижение себестоимости выпускаемой продукции и повышение ее качества; повышение производительности труда управленческих работников и рабочих производственных подразделений; улучшение использования материальных, трудовых и финансовых ресурсов, производственных фондов; сокращение или ликвидация брака; устранение узких мест и диспропорций в управлении и производстве.

ФСА давно перерос свое название, так как является не только методом анализа, позволяющим выявлять резервы и недостатки, но и методом обоснования и разработки мероприятий по совершенствованию системы управления, методом внедрения организационных мероприятий. Этапы проведения ФСА можно распределить по стадиям организационного проектирования. На стадии предпроектной подготовки осуществляются подготовительный, информационный, аналитический этапы ФСА; на стадии проектирования – творческий, исследовательский, рекомендательный; на стадии внедрения оргпроектов – внедрение результатов ФСА.

В 2002 году состоялось объединение двух крупных предприятий Украины: производственного объединения «Заря» и научно-производственного предприятия «Машпроект» в государственное предприятие «Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Зоря»-«Машпроект». Таким образом, перед руководством вновь созданного предприятия встала необходимость создания структуры управления, не просто исключающей дублирование функций и дублирующих подразделений, а совершенно новой структуры, исходя из новой стратегии развития и позиционирования предприятия на рынке газотурбинной техники.

При осуществлении любого проекта возможны различные подходы. Схематично их можно изобразить так, как на рис. 1.

Учитывая сложность и трудоемкость стоящей перед руководством предприятия задачи, а также ограниченные временные рамки, материальные и человеческие ресурсы, но в тоже время, обладая высококвалифицированными кадрами в области управления персоналом, приоритет был отдан методу функционально-стоимостного анализа системы управления.

Итак, объект ФСА – выбор и создание современной структуры управления наукоемким предприятием, способной обеспечить функционирование предприятия в условиях периодических финансово-экономических кризисов и постоянной жесткой конкуренции на рынках газотурбинной техники, структуры управления, способной обеспечить инновационное развитие предприятия и быструю модернизацию производства [1].

МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА  
КАК ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

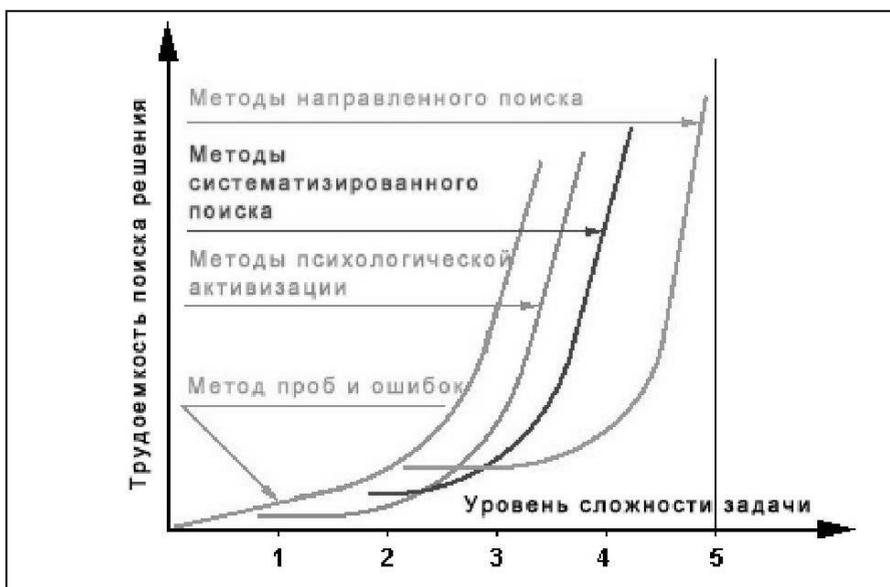


Рис. 1. Методы поиска решения

На подготовительном этапе были созданы исследовательские рабочие группы, которые занялись подготовкой, систематизацией и изучением информации, необходимой для выполнения поставленной цели. Итогом этой работы стало построение диаграммы функций предприятия (диаграммы FAST), рис. 2 по методике [2, 3].

На следующем, аналитическом, этапе были выявлены, сформулированы и классифицированы общеобъектные, внутриобъектные, а также функциональные связи. Были определены тринадцать приоритетных функциональных направлений и соответственное им количество дирекций по функциям. Число тринадцать в данном случае не смутило исследовательские группы, так как кроме различных суеверий, связанных с ним, это еще и число ряда Фибоначчи (1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34 ...). Отношение соседних чисел ряда Фибоначчи, как известно, при  $n \rightarrow \infty$  стремится к «золотой пропорции» 1,618..., которая еще называется «константой гармоничности». Разработанная структура управления предприятием представлена на рис. 3.

Комплексный план реорганизации структуры управления предприятием предусматривал создание службы финансового директора, которая включила в себя бухгалтерию, финансовый отдел, как самостоятельное подразделение и вновь созданный отдел управленческого учета, которому вменили в обязанность подготовку специалистов и построение системы бюджетирования с «чистого листа».



МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА  
КАК ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

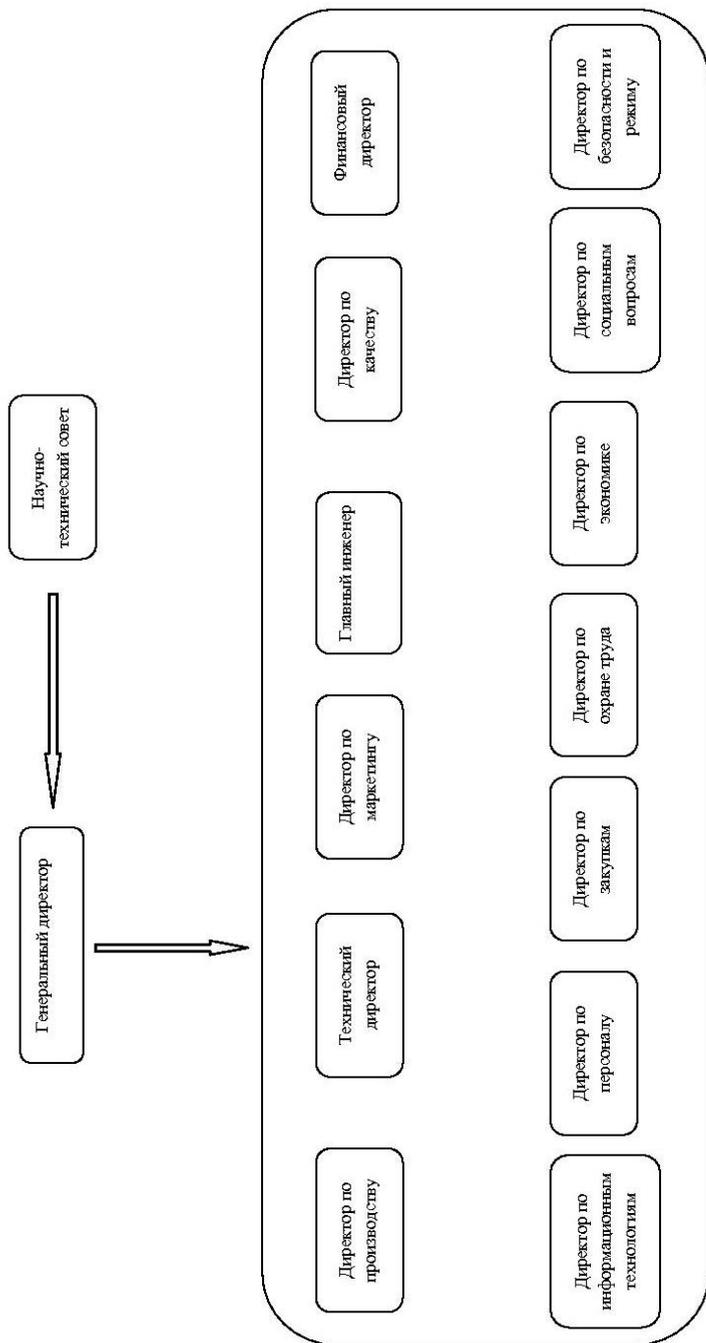


Рис. 3. Структура управления наукоемким предприятием

## МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА КАК ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

---

Служба коммерческого директора была реорганизована коренным образом в связи с созданием системы бюджетирования и преобразована в службу директора по закупкам, централизовав при этом все закупки предприятия по всем направлениям.

Вновь были созданы службы технического директора и директора по информационным технологиям. Служба технического директора включила в себя структурные подразделения, занимающиеся разработкой новой и модернизацией существующей техники, опытное производство, а также подразделения, занимающиеся научно-исследовательскими работами.

Службе директора по информационным технологиям предстояло заняться созданием единого информационного пространства предприятия на основе внедрения систем планирования ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning System (ERP)) и управления взаимодействием с клиентами (Customer Relationship Management System (CRM)). Учитывая масштабы предприятия и обилие различных баз данных в структурных подразделениях предприятия, эта задача была очень сложной и трудоемкой.

Существенно были переформатированы и изменены функции других служб директоров. Например, на службу директора по экономике были возложены обязанности подготовки и проведения тендерных закупок, на службу главного инженера – централизация служб жизнеобеспечения предприятия и дополнительные работы по модернизации производственных мощностей.

На основании тщательного анализа основных и вспомогательных функций служб директоров экспертными группами составлена матрица функций, которая представлена на рис. 4. Данная матрица функций необходима для построения функционально-стоимостной диаграммы затрат служб директоров по функциям управления, которая формализует исследуемые параметры и позволяет на основе анализа определить тактические и стратегические направления развития и совершенствования структуры управления наукоемким предприятием. Функционально-стоимостная диаграмма затрат служб директоров по функциям управления представлена на рис. 5.

На диаграмме (рис. 5) показана кривая Парето. Закон Парето, или принцип Парето, или принцип 20/80 – эмпирическое правило, названное в честь экономиста и социолога Вильфредо Парето, в наиболее общем виде формулируется как «20 % усилий дают 80 % результата, а остальные 80 % усилий – лишь 20 % результата». Данный принцип мы будем использовать как базовую установку в анализе факторов эффективности управленческой деятельности наукоемкого предприятия и оптимизации её результатов. Правильно выбрав минимум самых важных действий, можно быстро получить значительную часть планируемого полного результата,

**МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА  
КАК ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ**

---

при этом дальнейшие улучшения неэффективны и могут быть неоправданны.

Затраты, лежащие выше кривой Парето, показывают недостаточность финансирования функции и наоборот. В приведенном примере при анализе функции директора по маркетингу видно, что с целью увеличения продаж газотурбинной техники, предприятию следует сделать акцент на ее продвижении на рынках. Это может быть более активная работа с заказчиками, улучшение сервисного гарантийного и послегарантийного обслуживания, более агрессивная информационно-рекламная политика, т.е., активное использование всего современного арсенала средств для продажи своей продукции.

Затраты, лежащие ниже кривой Парето, не обязательно необоснованны, но в обязательном порядке должны быть проанализированы и учтены при создании стратегических планов развития предприятия. Например, увеличенные затраты в службе директора по качеству вызваны большим штатом контролеров отдела технического контроля.

На данном этапе они неизбежны, но могут быть оптимизированы путем замены универсального оборудования специальным, снабженным активными системами контроля размеров деталей. Производительность труда в области контроля качества изготавливаемой продукции следует увеличивать также путем приобретения специальных измерительных машин и комплексов.

Увеличенные затраты службы главного инженера объясняются изношенностью станочного парка предприятия и вынужденной необходимостью содержать многочисленные ремонтные службы. На предприятии имеется большой процент коммуникаций, требующих ремонта. Это водопроводы, теплотрассы и т.д. Такие затраты можно оптимизировать, значит, необходимо предусматривать капитальные вложения по этим направлениям, снижая расходы на их текущее обслуживание.

Анализ службы директора по персоналу показывает, что дополнительные затраты вызваны в основном двумя факторами: это затраты на подготовку, переподготовку и переквалификацию персонала и затраты на содержание нормировочного аппарата, обслуживающего сдельную форму оплаты труда. Население г. Николаева, где находится предприятие, составляет 500 000 человек. В таком городе предприятие испытывает недостаток высококвалифицированных кадров, адаптированных к работе на сложном технологическом оборудовании, поэтому затраты на подготовку персонала необходимы и оправданы. В ближайшей перспективе предприятие и дальше будет вынуждено готовить кадры для себя за счет собственных средств. Затраты на содержание нормировочного аппарата являются вынужденными из-за применения сдельной системы оплаты труда, которая на данном этапе развития предприятия неизбежна вследствие эксплуатации устаревшего технологического оборудования и технологий.

**МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА  
КАК ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ**

Службы директоров по направлениям		Директор по производству	Директор по маркетингу	Директор по персоналу	Директор по закупкам	Директор по охране труда	Директор по финансам	Директор по безопасности
№13 Иск. функции	Управление производством и контроль	В	В	В	В	В	В	В
	Управление производством, планированием	В	В	В	В	В	В	В
	Управление изучением и использованием рынка, продвижением продукции на рынке	В	В	В	В	В	В	В
	Управление качеством и культурой производства	В	В	В	В	В	В	В
	Управление конструкторской, технологической и инженерной подготовкой производства	В	В	В	В	В	В	В
	Управление процессами финансирования, бухгалтерский, налоговый и управленческий учет и отчетность	В	В	В	В	В	В	В
	Управление обеспечением кадрами, повышением квалификации	В	В	В	В	В	В	В
	Управление обеспечением материально-техническими ресурсами	В	В	В	В	В	В	В
	Управление информационно-технологическим обеспечением	В	В	В	В	В	В	В
	Управление охраной труда	В	В	В	В	В	В	В
	Управление безопасностью и режимом	В	В	В	В	В	В	В
	Управление социальными вопросами	В	В	В	В	В	В	В
	Управление документооборотом	В	В	В	В	В	В	В

Рис. 4. Матрица функций служб директоров по направлениям

**МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА  
КАК ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ**

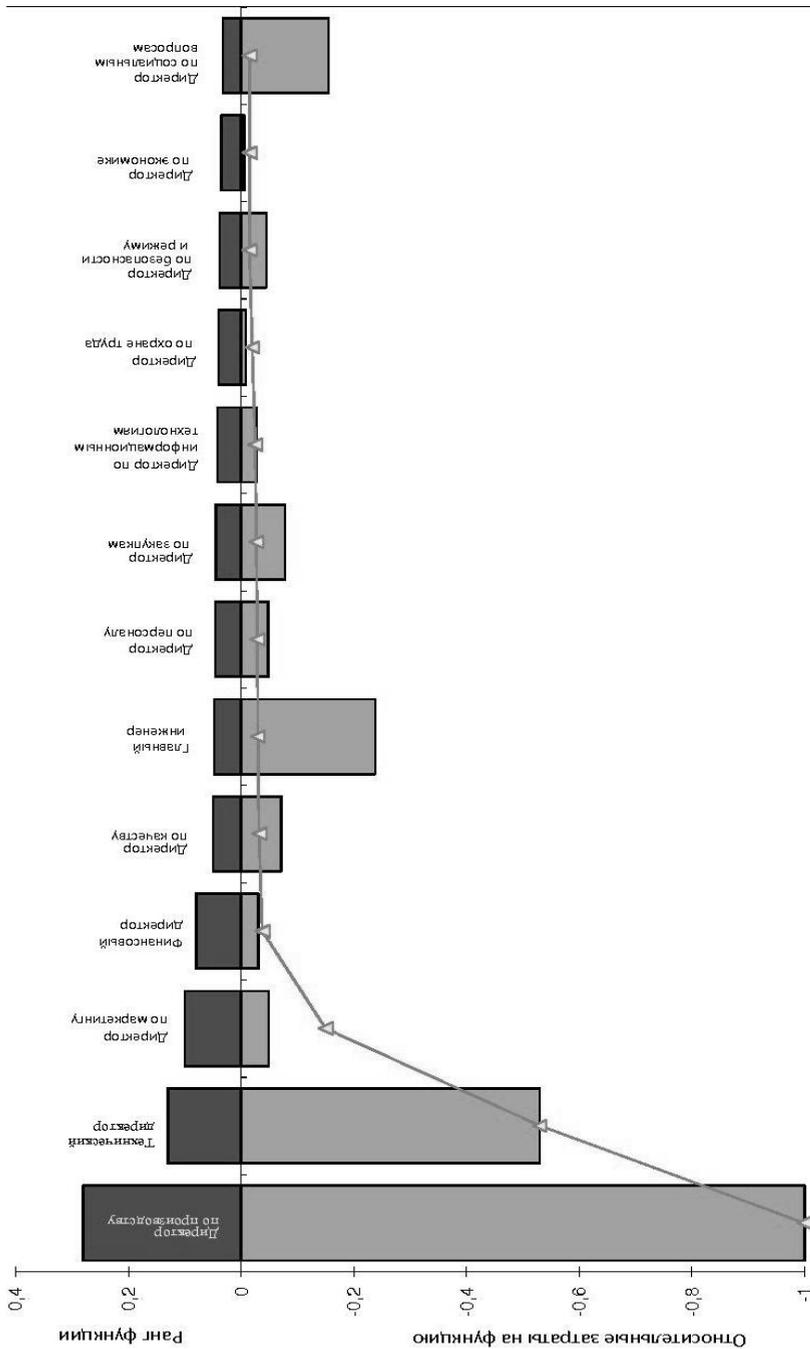


Рис. 5. Функционально-стоимостная диаграмма относительных затрат директоров по направлениям

**МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА  
КАК ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ**

---

Дополнительные затраты службы директора по закупкам объясняются неразвитостью рынка закупок материалов и комплектующих, таможенными барьерами, сложной процедурой тендерных закупок и т.д. В службе директора по безопасности дополнительные затраты вызваны большим периметром предприятия и недостаточностью финансирования закупок электронных средств охраны и контроля доступа на предприятие. И самый большой вопрос для крупных предприятий, особенно государственного сектора, – это социальные объекты, которые предприятие вынуждено содержать за счет собственных средств. Это детские сады, базы отдыха, профилакторий, жилой фонд и др. Опыт предприятий Украины, не говоря уже о других странах, показывает, что управление социальными объектами должно осуществляться профессионалами. Предприятия же должны предоставлять своим работникам компенсационные пакеты, учитывая их потребности. Именно целевой социальный пакет производит бóльший мотивирующий эффект, чем содержание социальной инфраструктуры. Если у работника взрослые дети, то он не пользуется детскими садами и детскими лагерями, но оплачивает их. Социальный пакет позволяет учитывать потребности персонала более гибко. На выбор работнику может быть предоставлена компенсация содержания ребенка в детском саду, питания, парковки, медицинских услуг, найма жилья и т.д. Предоставление социальных пакетов более выгодно и предприятию, так как обходится дешевле содержания социальной инфраструктуры.

После проведения ФСА структуры управления наукоемким предприятием логическим завершением станет разработка инновационных и инвестиционных проектов, конечной целью которых будет дальнейшая оптимизация этой структуры, подкрепленная точными знаниями и математическими расчетами.

**Вывод.** ФСА структуры управления проектно-ориентированного наукоемкого предприятия – один из наиболее эффективных практических методов проектирования и совершенствования структур управления как предприятия в целом, так и отдельных служб и проектов. Данный метод направленного поиска решения сложных задач позволяет достичь результата с наименьшими затратами труда и материальных ресурсов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Глиненко Л.К., Лужко Е. В. *Проектирование организационных структур управления.* – К.: Нора-Друк, 2005. – С. 114-119.
2. *Справочник по функционально-стоимостному анализу / Под ред. М.Г. Карпунина, Б.И. Майданчика.* – М.: Финансы и статистика, 1988. – С. 107-132.
3. Рыжова В.В. *ФСА в решении управленческих задач по сокращению издержек.* – М.: Эксмо, 2009. – С. 66-103.

МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА  
КАК ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

---

4. Нив Г.Р. *Пространство доктора Деминга. Принципы построения устойчивого бизнеса.* – М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. – 369 с.
5. *Основы функционально-стоимостного анализа.* – М.: Энергия, 1980. – 175 с.
6. *Функционально-стоимостный анализ качества продукции и управления маркетингом на предприятии / О. Ю. Гордашников.* – М.: Альфа-Пресс, 2006. – 86 с.

*Надійшла 11.04.2011*

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор Миколаївського національного університету кораблебудування **К.В. Кошкін**.

## АНАЛИЗ СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

---

---

*Рассматриваются методические положения сравнительного анализа предприятий транспортной отрасли, исследуется методика анализа среды функционирования логистической системы.*

*Розглядаються методичні положення порівняльного аналізу підприємств транспортної галузі, досліджується методика аналізу середовища функціонування логістичної системи.*

*The methodical regulations of comparative analysis of the transport industry companies are considered. Methodology analysis of environmental functioning logistics system is investigated.*

**Ключевые слова:** *сравнительный анализ, эффективность, анализ среды функционирования.*

**Постановка проблемы.** Во многих сферах человеческой деятельности часто возникает задача оптимального выбора, т.е. выбора объекта с максимальной количественной оценкой его качества из некоторого имеющегося множества исследуемых объектов. При этом оценка качества может быть как интегральной, т.е. по всем рассматриваемым критериям, так и частной (по одному или группе критериев). Для осуществления такого выбора необходимо проведение анализа, который для изучения сложных, многоаспектных объектов требует серьезных аналитических усилий. В общем случае анализ должен быть комплексным, поскольку нет смысла анализировать отдельно взятые объекты, процессы и явления без конкретного социально-экономического, политического или какого-либо другого контекста, без всестороннего анализа их предпосылок и последствий. Изолированность объектов, процессов и явлений весьма относительна. Каким бы своеобразием они ни обладали, между ними всегда существует определенная общность, открытость друг для друга, зависимость одного от другого. Изменение одной части системы неизбежно влечет за собой соответствующие изменения других ее частей. Поэтому цель анализа состоит не столько в том, чтобы изучить сущность изолированных объектов, сколько в том, чтобы отыскать – насколько это возможно – связи между отдельными объектами.

При проведении сравнительного анализа какая-либо область рассматривается не узкопредметно, а системно, во взаимодействии различных объектов (компонентов) системы. На выявлении характера связей, закономерностей взаимодействия объектов между собой сконцентрированы методологические основы сравнительного анализа. При этом аналитический подход закономерно перерастает в синтетический, системный, позволяющий создавать картину действительности более адекватно, про-

## АНАЛИЗ СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

---

слеживая причинно-следственные связи, которые чаще всего лежат за узкими рамками ограниченного объекта. В настоящее время за счет использования в производстве высокоэффективных технологий, высокопроизводительного, точного и экономичного оборудования, производственные издержки снижены до минимума, а доведение промежуточного и конечного готового продукта до потребителя сопряжено со значительными затратами, которые складываются из затрат на погрузочно-разгрузочные и транспортные операции, операции складирования и хранения. Эффективность логистики, особенно на микроуровне – на предприятиях различных направлений производственно-хозяйственной деятельности, зависит, прежде всего, от точной формулировки функций каждого звена микрологистической цепи, четкого разграничения функций между звеньями. В связи с этим большое значение имеют анализ и оценка эффективности функционирования логистической системы, с целью определения наиболее уязвимых мест в системе, а также параметров, приносящих наибольшую отдачу.

Известные из литературных источников [1-13] подходы к оценке эффективности сложных систем управления основаны на таких методах сравнения объектов как метод анализа иерархий, метод комплексной оценки, сравнение с использованием функций полезности, методы экспертных оценок. Недостатком приведенных методов является низкая степень детализации взаимосвязей и взаимодействий отдельных параметров логистической системы.

**Целью работы** является развитие методических положений оценки эффективности логистической системы.

**Изложение основного материала.** Эффективность логистической системы описывается показателем или системой показателей, характеризующих качество работы системы при заданном уровне логистических издержек. Эффективность логистической системы как системы массового обслуживания характеризуется вероятностью успеха логистических операций при заданном критерии оптимальности и изменяется в пределах от нуля до единицы. С точки зрения потребителя, являющегося конечным звеном логистической цепи, эффективность логистической системы определяется в первую очередь двумя показателями – качеством обслуживания и ценой обслуживания. Качество обслуживания, в свою очередь, описывается комплексным показателем, исчисляемым по совокупности критериев, состав которых может варьироваться для различных систем. Важнейшим из этих критериев является способность логистической системы обеспечить доставку нужного потребителю товара в обусловленный срок и требуемое место. Основными факторами, оказывающими влияние на процесс доставки груза в логистической системе, являются показатели ее внешней и внутренней среды, а также тенденции изменения этих показателей (рис. 1).

АНАЛИЗ СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

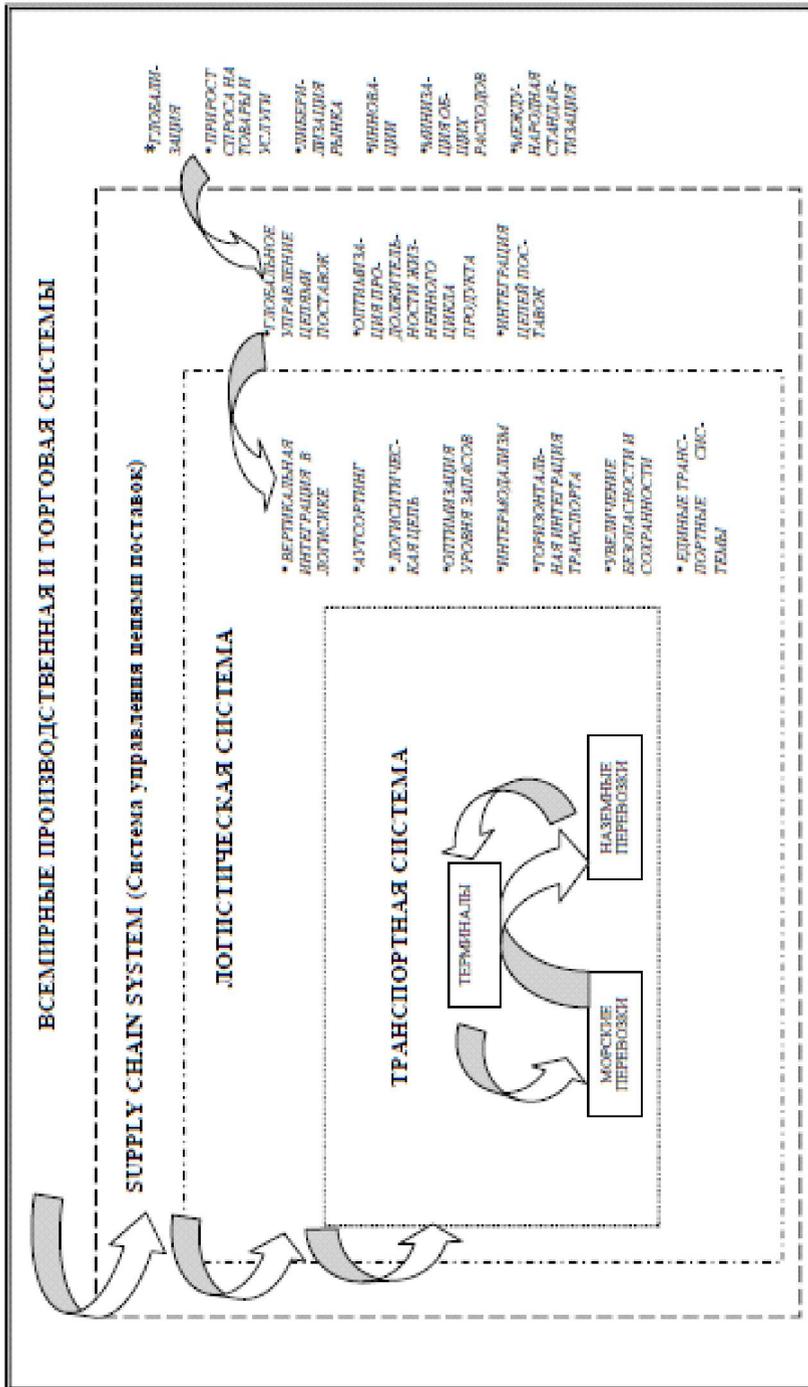


Рис. 1 Уровни и факторы анализа среды функционирования материалооборачивающих систем

## АНАЛИЗ СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

---

Одним из наиболее распространенных методов оценки эффективности систем является метод, известный под названием «анализ среды функционирования» (АСФ) [14-17]. Он был разработан в 1978 г. и с тех пор завоевал широкую популярность. Также известный как Data Envelopment Analysis (DEA), метод АСФ применяется для оценки эффективности функционирования однородных объектов в таких областях, как экономика, социальная сфера, административное управление.

АСФ (DEA) основан на построении так называемой границы эффективности в многомерном пространстве входных и выходных переменных, описывающих исследуемые объекты. Эта граница строится по реальным данным и представляет собой, по сути, оценку производственной функции для случая, когда выход является векторным. Степень эффективности зависит от расстояния между объектом и границей эффективности.

*Анализ среды функционирования* – средство сравнительного анализа деятельности сложных экономических и социальных систем. В настоящее время методология АСФ охватывает гораздо более широкий спектр понятий и возможностей, чем просто вычисление и анализ эффективности сложных объектов. Методология АСФ имеет глубокую связь с математической экономикой, системным анализом, многокритериальной оптимизацией, позволяет строить многомерное экономическое пространство, находить оптимальные пути развития в нем, вычислять важнейшие количественные и качественные характеристики поведения объектов, моделировать различные ситуации.

АСФ реализует классические методы проведения анализа эффективности экономических систем в сочетании с функциями финансового планирования и бенчмаркинга (как метода поиска лучшей практики ведения бизнеса). АСФ включает модель входо-ориентирования, модель выходо-ориентирования, модель «суперэффективность», модель учета неконтролируемых переменных.

*Модель входо-ориентирования* обеспечивает расчет эффективности объектов управления с помощью уменьшения затрат и выделения неиспользованных ресурсов. Входо-ориентированная модель, например, применяется при решении задачи выделения неэффективно используемых ресурсов склада в логистической сети.

*Модель выходо-ориентирования* позволяет определить максимальный объем результата деятельности объекта при сохранении текущего объема потребления входящих ресурсов. Выходо-ориентированная модель может применяться при решении задачи повышения доходности терминала в логистической системе.

*Модель «суперэффективность».* При проведении АСФ обеспечивается сравнение терминалов между собой по критерию эффективности их работы. Методика суперэффективности позволяет выявить преимуще-

**АНАЛИЗ СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

ства одного лидирующего объекта в логистической системе перед другим лидирующим объектом.

*Модель учета неконтролируемых переменных* позволяет учитывать возможность или невозможность произвольного изменения параметров объекта исследования. Например, общий размер складской площади или пропускная способность определенного объекта могут рассматриваться как неконтролируемые параметры, но которые оказывают воздействие на эффективность работы системы.

Рассмотрим постановку и общий вид модели выходо-ориентирования. Пусть требуется определить показатель относительной эффективности каждого из  $s$  объектов (логистических терминалов) (рис.2).

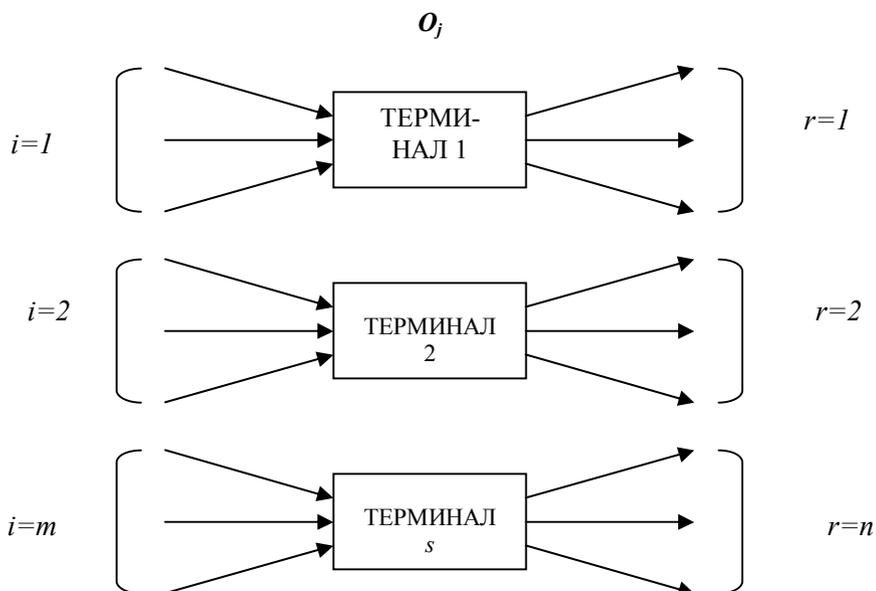


Рис. 2. Структурные составляющие выходо-ориентированной модели оценки эффективности логистических терминалов

Для описания каждого объекта  $O_j$ ,  $j = \overline{1, s}$ , служит пара векторов  $(x_j, y_j)$ . При этом вектор  $X_j = (x_{1j}, \dots, x_{mj}, \dots, x_{sj})$  содержит входные показатели (входы) для объекта  $O_j$ , а вектор  $Y_j = (y_{1j}, \dots, y_{nj}, \dots, y_{sj})$  содержит выходные показатели (выходы) для объекта  $O_j$ .

**АНАЛИЗ СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

$$X_j = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1s} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{ms} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$Y_j = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1j} & \cdots & y_{1s} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2j} & \cdots & y_{2s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nj} & \cdots & y_{ns} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Тогда матрица  $X$ , имеющая размерность  $m \times s$ , содержит вектор-столбцы с входными данными для всех  $s$  объектов, а матрица  $Y$ , имеющая размерность  $n \times s$ , содержит вектор-столбцы с выходными данными для всех  $s$  объектов.

Критерием эффективности логистической системы является максимизация суммарного значения относительной эффективности функционирования объектов

$$F(u, v)_{\max}^j = \frac{\sum_{r=1}^n u_r \cdot y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{ij}} \quad (j = 1, \dots, s), \quad (3)$$

где  $F(u, v)_{\max}^j$  – скаляр, являющийся мерой эффективности  $j$ -го объекта. Критерием эффективности объекта является условие равенства 1. Объекты, имеющие такое значение, считаются эффективными и находятся, как принято говорить, на *границе эффективности*. Аналогичная задача решается для каждого объекта, т. е.  $s$  раз. Для объектов, имеющих  $F(u, v)_{\max}^j < 1$ , предлагаются рекомендуемые (целевые) значения показателей, достигнув которых, эти объекты также окажутся на границе эффективности.

$v_1, v_2, \dots, v_m$  – весовые коэффициенты показателей на входе.

$u_1, u_2, \dots, u_n$  – весовые коэффициенты показателей на выходе.

Ограничение, характеризующее условие отношения показателей на входе к показателям на выходе, имеет следующий вид:

$$\frac{\sum_{r=1}^n u_r \cdot y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{ij}} \leq 1 \quad (j = \overline{1, s}) \quad (4)$$

**АНАЛИЗ СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

$$1 \geq v_i \geq 0 \quad (i = \overline{1, m})$$

$$1 \geq u_r \geq 0 \quad (r = \overline{1, n})$$

Опираясь на данные, представленные на рис. 2, определим величину относительной эффективности условных логистических терминалов (табл.1).

Определение целевых значений переменных для неэффективного объекта производится путем *проецирования* данного объекта на линию эффективности. Проецирование обеспечивается за счет присутствия в модели (3-5) весовых коэффициентов. Линия эффективности в данном случае определяется эффективными (крайними) точками (рис.3).

Таблица 1

Относительная эффективность логистических терминалов

терминал	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
краны, шт.	2	4	6	10	12	10	14	14
грузопоток, тыс. TEU	200	440	500	630	600	756	1000	980
грузопоток/ краны	100	110	83	63	50	75,6	71,4	70
относительная эффективность	91 %	100 %	76 %	57 %	50 %	69 %	65 %	63 %

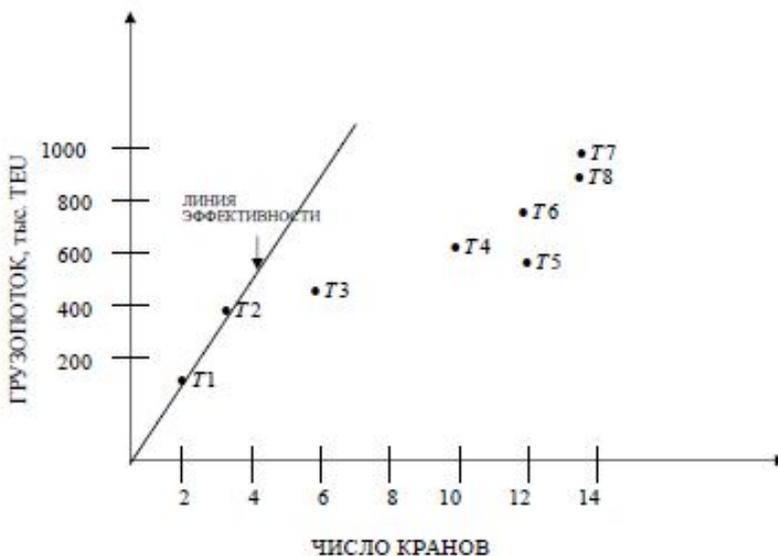


Рис.3. Сравнительный анализ терминалов

## АНАЛИЗ СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

---

**Выводы.** Метод сравнительного анализа является универсальным общенаучным методом исследования. Он является гносеологическим стержнем и ориентиром, дающим общее направление исследованию и регулирующим взаимодействие всех методов. Метод используется, в частности, как базовый при статистическом, социологическом и факторном анализе, при классификации, оценивании, прогнозировании процессов и явлений. В процессе анализа каждый из сравниваемых объектов логически раздваивается с двух позиций – в нем обнаруживается, с одной стороны, то, что является общим с другими объектами, а с другой – то, что отличает его от других объектов. Сравнение является необходимым элементом диалектического метода познания, чем и определяется весьма большое методологическое значение сравнения в исследованиях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности* / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 250 с.
2. *Амосов А.А. Вычислительные методы для инженеров* / А.А. Амосов, Ю.А. Дубинский, Н.В. Копченова. – М.: Высшая школа, 1994. – 544 с.
3. *Батищев Д.И. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений* / Д.И. Батищев, Д.Е. Шапошиников. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. – 92 с.
4. *Бешиелев С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок* / С.Д. Бешиелев, Ф.Г. Гурвич. – М.: Статистика, 1980. – 264 с.
5. *Гафт М.Г. Принятие решений при многих критериях*. – М.: Знание, 1979. – 64 с.
6. *Дэвид Г. Метод парных сравнений*. – М.: Статистика, 1978. – 144 с.
7. *Кини Р. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения* / Р. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
8. *Орлов А.И. Нечисловая статистика*. – М.: МЗ-Пресс, 2004. – 513 с.
9. *Подиновский В.Н. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач* / В.Н. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 255 с.
10. *Питерс Т. В поисках эффективного управления: опыт лучших компаний* / Т. Питерс, Р. Уотермен. – М.: Прогресс, 1986. – 424 с.
11. *Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий*. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

**АНАЛИЗ СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

---

---

12. Сапожков К.А. *Выбор и применение систем логических элементов ЭВМ* / К.А. Сапожков, А.М. Бершадский, В.Б. Пац. – М.: Энергия, 1980. – 73 с.
13. Смородинский С.С. *Методы анализа и принятия управленческих решений: Учебное пособие* / С.С. Смородинский, Н.В. Батин. – Минск: БКУУ, 2000. – 101 с.
14. Farrell M.J. *The Measurement of Productive Efficiency* / M.J. Farrell // *Journal of the Royal Statistical Society*. – 1957. – Vol. 120. – P. 253-281.
15. Charnes A. *Measuring the efficiency of decision-making units* / A. Charnes, W.W. Cooper, E. Rhodes // *European Journal of Operation Research*. – 1978. – Vol. 2. – № 6. – P. 429-444.
16. Banker R.D. *Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis* / R.D. Banker, A. Charnes, W.W. Cooper // *Management Science*. – 1984. – Vol. 30. – № 9. – P. 1078-1092.
17. Cooper W.W. *Data Envelopment Analysis* / W.W. Cooper, L.M. Seiford, K. Tone. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. – 318 p.

*Надійшла 28.12.10*

**Рецензент** – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри «Системний аналіз і логістика» Одеського національного морського університету **І.О. Лапкіна**.