

Министерство образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.Л.Васильев

**ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСА СУДОВ**

**СИСТЕМА НАБОРА ПЕРЕКРЫТИЙ КОРПУСА
ВЫБОР ШПАЦИИ**

*Утверждено советом университета
в качестве учебного пособия*

Ук 5501



Санкт-Петербург
2000

Васильев А.Л. Вопросы проектирования конструкций корпуса судов. Системы набора перекрытий корпуса. Выбор шпаций. Учеб. пособие. СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. 84 с.

Пособие содержит материалы к двум темам дисциплины «Проектирование судовых корпусных конструкций». Рассмотрены вопросы выбора, в частности на выбор систем набора, и представлены рекомендации по выбору. Приведены результаты исследований влияния шпации на массу и трудоёмкость изготовления судовых перекрытий. Показаны возможности и пути стандартизации шпаций как основополагающего элемента судовых конструкций.

Пособие написано для студентов всех специальностей факультета кораблестроения и океанотехники СПбГМТУ дневной, вечерней и заочной формы обучения, а также пособие может быть полезно студентам дисциплины «Общее устройство судов» и инженерам конструкторского бюро.

Ил. 31. Табл. 5. Библиогр.: 7 назв.

Рецензенты: главный специалист по корпусу Российского Морского Регистра Судостроительства Р.Л. Рейнер
зам. начальника ОБ ИЦ ГУП «Адмиралтейские верфи» С.И. Кучменко

ISBN 5-88303-187-0

© СПбГМТУ,
2000

*Любовь и судьбу совершили
отдельно от любви, которую люди
использовали во имя других лю-
дьми своей рук.*

Джозеф Конрад¹

ОТ АВТОРА - СТУДЕНТАМ

Я знаю, что читает всякие там издания «от автора» большая часть студентов. Убежден, что большая часть напрасно не читает. Ведь каждый автор хочет доверительного разговора с тем, кто взял в руки его книгу. Поэтому господа студенты, добравшись на своем многотрудном пути к до этого учебного пособия, прошу напрячься...

Темы глав 1 и 2 «Системы набора перекрытий корпуса» и «Выбор шпации» достаточно важны и ответственные при проектировании судна системы набора и величины шпации определяются на стадии эскизного проекта и изменить принятые решения в дальнейшем уже невозможно. Поэтому в пособии много внимания уделяется не только проблеме обеспечения надежности при выборе системы набора и величины шпации, но и малому технологичности принимаемых решений.

А еще я хочу, чтобы все услышали мое «спасибо» тем, кто помог работать над учебным пособием: своему бывшему студенту и коллеге, ныне главному специалисту по корпусу Российского Морского Регистра Судостроительства Р.Л. Рейнеру; зам. начальника ОБ ИЦ ГУП «Адмиралтейские верфи» С.И. Кучменку, другу и соратнику с первых лет совместного судостроения заслуженному конструктору Российской Федерации проф. М.К.Галышину; данному коллеге по кафедре научному редактору этого пособия, канд.техн.наук, доцента В.Н. Лазареву, знания которого, педагогический опыт и требовательность легендарны.

¹ Конрад Дж. В зеркале моря. Одесс: «Маяк», 1979. Джозеф Конрад - псевдоним Юзефа Теодора Конрада Коженковского (1857-1924), писателя-мариниста.

Все они с исключительной добросовестностью выявили (и исключили!) ошибки и неточности в рукописях и предлагали уточнения ряда положений, способствующих общему улучшению пособия.

И еще спасибо моему бывшему студенту С.Б. Васильеву, выполнявшему многие рисунки, в частности те, которые делают изучение предлагаемого материала не таким скучным занятием, а также сегодняшней студентке М.В.Лавровой, продолжающей эту традицию.

ГЛАВА 1. СИСТЕМЫ НАБОРА ПЕРЕКРЫТИЙ КОРПУСА

... Система является системой в том смысле, что она состоит из взаимосвязанных частей и в определенном смысле представляет законченное целое. Добавление или исключение какого-либо элемента в подобной системе либо разрушает ее, либо существенно изменяет ее свойства и функциональные возможности.

Стаффорд Бир¹

Как уже известно, корпус судна состоит из донныхых, бортовых, палубных перекрытий, составляющих полую трубчатую балку, и разделен поперечными и продольными переборками на отсеки.

Каждое из таких перекрытий образовано листами и балками набора. Это категорическое утверждение требует комментария.

История судостроения знает много примеров любопытных технических решений. В будущем мы познакомимся с рядом решений, где количество некоторых балок набора существенно уменьшено или их нет вовсе.

Как на интересный пример "безбортового" судна, в конструкции которого используется "арочный" принцип, можно указать на п/х "Carbon" (рис.1). Судно было построено из железа в 1855 г. в Ливерпуле и имело размеры: $L = 194,7'$ (59,4 м), $B = 27,6'$ (8,4 м), $H = 19,1'$ (5,8 м). Двойное дно - для балласта. Поперечная прочность бортов и палубы обеспечивалась исключительно за счет их арочной формы и достаточной толщины обшивки. Судно получило класс Регистра Ллойда и благополучно проплавало до 1870 г.² Вслед

¹ Стаффорд Бир. Кабинетная и управленческая инженерия. М.: Наука, 1963, С.23.

² TINA, 1909, с.231 (по данным TINA, 1877 - судно плавало, по крайней мере, до 1877 г.).

за "Сайбол" был построен несколько больших размеров п/х "Лабил" аналогичной конструкции.

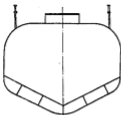


Рис.1. «Сайборн» конструкция борта на п/х «Сайбол»

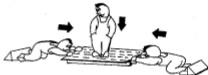
1.1. Назначение набора. Классификация систем набора

На судовые перекрытия действуют в общем случае две группы сил:

- 1) усилия, перпендикулярные к плоскости перекрытия - давление воды, льда, усилий от швартовок, масса груза, балласта и т.д.;
- 2) усилия в плоскости перекрытия - усилия от общего крена судна, давление со стороны переборок, для которых рассматриваемое перекрытие является опорой и др.

Очевидно, что листы перекрытий могут хорошо (если нет потери устойчивости листов и достаточна по условиям прочности площадь поперечного сечения) воспринимать нагрузки в своей плоскости. Нагрузки же, перпендикулярные плоскости перекрытия, листы передают на свои опоры - на подкрепляющие их балки набора (см.

схему передачи усилий¹ на рис.2); поперечная нагрузка распределена равномерно и расстояние между балками одинаковое) на одну балку, поперечная - на другую балку. Таким образом, на каждую балку 1 действует нагрузка, снимаемая с прилегающих (опирающихся) участков обшивки, равных (опять-таки при действии равномерно распределенной нагрузки) полусумме расстояний до соседних балок - ширине a . В свою очередь, любая из балок 1, воспринимая нагрузку, передаст ее уже с ширины обшивки l на свои опоры: более жесткие балки 2 или другие перекрытия.



Кроме восприятия поперечной нагрузки балки набора, разбивая обшивку на участки, обеспечивают устойчивость листов при действии сжимающих усилий (например, от общего крена судна).

Балки набора каждого перекрытия могут быть ориентированы как вдоль, так и поперек судна. Расположение балок набора и характеризует систему набора.

¹ В курсе строительной механики иногда рассматривается более точная (и более сложная) схема передачи усилий.

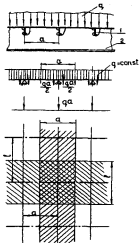


Рис 2. Схема восприятия и передачи усилий, действующих на перекрытие

Систему набора обычно классифицируют по формальному признаку:¹ если большинство балок (такие балки называются балками главного направления) набора ориентировано вдоль судна - система называется продольной; если балки главного направления идут поперек судна - система поперечная. На рис.3 приведены типичные варианты системы набора (в качестве примера взяты дощатые перекрытия). Несмотря на кажущуюся простоту, схема набора содержит обширную информацию: границы и соотношение сторон осязного контура перекрытия, количество и расположение всех балок набора - балок главного направления и поперечных связей, на которые балки главного направления могут опираться, расстояния между ними, какие балки идут непрерывно и какие разрезаются (разрывы линий на схеме).

Классификация только по формальному признаку иногда может привести к неправильному определению системы набора, например, в узких и длинных перекрытиях. На рис.4 показано такое перекрытие - участок палубы при большой ширине доков - большинство балок (равные балки) расположены поперек судна, хотя назвать та-

¹ Существует еще признак классификации по способу передачи усилий (классификация по Н.Г. Бубнову): «Если нагрузка передается главным образом на поперечные ребра при помощи продольных балок, т.е. лонжеронов (girder), то система набора называется продольной; если передача производится при помощи шпалотупных балок (crossbeams Posts with battens and stumps frames) на продольные ребра при богах судна, то система набора называется поперечной; наконец, если ряд балок главного направления перекрыть несколькими поперечными балками, то возможны два случая:

а) поперечные балки достаточно жестки..., чтобы поддерживать в той или иной мере все балки главного направления, не исключая и идущие по середине перекрытия; такую систему мы назовем с м с а в н о й;

б) поперечные балки настолько слабы..., что могут поддерживать только те балки главного направления, которые идут близ осязного контура, в обстоятельствах же когда остальные не имеют заметного влияния, в этом случае систему набора придется считать чисто продольной или чисто поперечной, в зависимости от того, как идут балки главного направления (Бубнов Н.Г. Набранные труды. Л.: Судпромизд, 1956, с.64).

кую систему набора поперечной нитью не решается. Поэтому заведем привычные признаки классификации по ориентации панелей, по которым разбивается обшивка балками набора. Если также панели своей длинной стороной ориентированы вдоль судна - система набора продольная, если поперек - система набора поперечная.

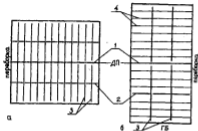


Рис.3. Системы набора: а - поперечная система; б - продольная система; 1 - вертикальный киль; 2 - стрингер; 3 - пол; 4 - длинная продольная балка



Рис.4. К классификации систем набора по ориентации панелей: 1 - бор; 2 - продольный киль; 3 - продольные подпалубные балки; 4 - рамы

Классификация систем набора по ориентации панелей не противоречит классификации по формальному признаку, а дополняет ее и делает более определенной.

В истории судостроения известны так называемая клетчатая система набора, когда частое расположение балок в двух перпендикулярных направлениях образует что-то вроде клеток с соотношением сторон, близких к единице. Сейчас такую систему снова можно встретить там, где требуется высокая жесткость перекрытия¹ по плоскости (малое перемещение под нагрузкой в направлении, перпендикулярном плоскости перекрытия).

Хотелось бы подчеркнуть, что правильно говорить о системе набора каждого перекрытия (длинного, бортового, палубного) или их отдельных участков, а о системе набора корпуса судна в целом можно говорить только тогда, когда все перекрытия корпуса выполнены по одной системе.

Часто встречающаяся в журнальных статьях фраза: "Корпус судна набран по смешанной системе набора..." является просто данью плохой традиции, так как обозначает лишь то, что какие-то перекрытия корпуса выполнены по продольной, а какие-то по поперечной системе.

По определению И.Г.Бубнова, смешанная система перекрытия еще имела какой-то смысл и обозначала сравнительно равномерную (смешанную) нагрузку балками набора действующую на перекрытия усилий перпендикулярно к его плоскости на опорный контур.

1.2. Факторы, влияющие на выбор системы набора

При проектировании корпуса судна выбору системы набора уделяется много внимания. Система набора, являясь одной из важнейших характеристик перекрытия корпуса, непосредственно влияет на массу перекрытия и на трудоемкость их изготовления.

¹ Например, клетчатая система двойного дна судов с АСУ требуется в малометном отделении.

И.Г. Бубнову, одному из основоположников строительной механики корабля, принадлежит такое образное выражение: "Как мост строит не вдоль, а поперек реки, так и при выборе системы набора борта надо располагать поперек перекрытия - по кратчайшему расстоянию". Мысль эта совершенно справедлива, так как при таком расположении балок обеспечивается наименьшая масса перекрытия.

Таким образом, одним из определяющих факторов при выборе системы набора является соотношение сторон опорного контура перекрытия. Проиллюстрируем это простым примером.

Имеем перекрытие со сторонами опорного контура b и l (рис.5) с балками набора, расположенными по короткому и длинному направлениям - поперек и вдоль перекрытия - на расстоянии a друг от друга (a - шаг). Пусть нагрузка q равномерно распределена и одинакова для обеих вариантов. Тогда, в соответствии с известными формулами, для каждой из балок расчетный момент сопротивления будет

$$W_b = \frac{qab^2}{k\sigma_{доп}}; \quad W_l = \frac{qal^2}{k\sigma_{доп}}$$

где k - численная величина, зависящая от степени заделки балки на опорах.

В рассматриваемом случае различие в массе перекрытия будет определяться только разницей масс балок набора, так как масса листов (толщина листов $\delta = f(q, a)$) не меняется.

Масса

$$m_b = \rho \left(\frac{l}{a} - 1 \right) b F_b,$$

масса

$$m_l = \rho \left(\frac{b}{a} - 1 \right) l F_l.$$

¹ В трудах И.Г. Бубнова в такого утверждения не нашел, по-видимому, это одна из красивых легенд, передаваемых его учениками из поколения в поколение.

где ρ - плотность материала (для стали $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$).

Используя понятие "удельная площадь профиля по моменту сопротивления" $C_w = \frac{F}{W^{2/3}}$ и зная, что для геометрически подобных

профилей коэффициенты C_w равны, получим

$$\frac{m_l}{m_b} = \frac{1 - a/b}{1/b - a/b} (l/b)^3.$$

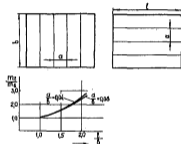


Рис.5. К определению соотношения масс балок набора в зависимости от соотношения сторон опорного контура

Разумеется, при $l/b = 1$ из условий местной прочности (при одинаковых в нашем примере допущениях) все равно, как располагать балки, вдоль стороны b или вдоль стороны l . Но при $l/b = 1,5$ разница в массе составит порядка 1,7, а при $l/b = 2,0$ масса q_l будет в 2,4 - 2,5 раза больше массы q_b .

Все эти рассуждения справедливы, так сказать, "в чистом виде": если систему набора выбрать из условий работы перекрытия на восприятие только поперечной нагрузки.¹ А таких перекрытий в корпусе судна мало, большинство из них участвует в восприятии усилий от общего килеба; особенно важна роль донцевого перекрытия в аранной палубе, образующих нижний и верхний пояски эквивалентного бруса (рис.6).

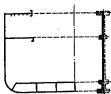


Рис.6. Поперечное сечение корпуса судна и его эквивалентный брус

Площадь каждого такого пояски F , как мы знаем, равна сумме площадей сечения листов и площадей сечения идущих вдоль судна непрерывных балок:

$$F = \sum bS + \sum f.$$

где b - ширина листа; S - толщина листа; f - площадь сечения балки набора.

Средняя толщина обшивки (без учета утолщенных листов, например, горизонтального кила или палубного стрингера) будет равна

¹ Практически всегда проектируют как бы приспособляя опорный контур, обеспечивая путем установки промежуточных жестких связей (флоры, рамные балки и др.) его разбивку на участки, каждый из которых перекрывается балками набора по кратчайшему направлению.

$$S_{eq} = \frac{F - \sum f}{\sum b}.$$

Следовательно, если формируя пояски эквивалентного бруса (определяя необходимую площадь поперечного сечения палуб или днища), мы не хотим получить непомерно большие, неконструктивные толшины,² приходится применять продольную систему набора, чтобы иметь возможность обеспечить восприятие усилий от общего килеба и балками, идущими вдоль судна. Например, площадь сечения нижнего пояски эквивалентного бруса судов, не имеющих двойного дна (танкеры старой постройки, буксера, рыбопромысловые суда), формируется на 15-30% за счет балок продольного набора. На первый взгляд, казалось бы, что, например, для танкера с двойным дном продольная система донцевого перекрытия может быть и не столь обязательна, но она становится целесообразной и просто необходимой для избежания больших толщин обшивки: ведь двойное дно давно применяется на крупных танкерах из экологических соображений (VLCC и ULCC³ - см. архитектурно-конструктивные типы судов). С середины 90-х годов Правила основных классификационных организаций (NY, LR и др.) требуют наличия двойного дна уже при $DW > 5000$ т и даже при $DW > 600$ т (!), если объем каждого грузового танка превышает 700 м³. Полагаю, что указанное обстоятельство открывает путь к бессмысленно необходимости продольной системы набора донцевого перекрытия малых танкеров: удовлетворение требований по минимальным толщинам толкает к лишнему применению продольных балок набора.⁴

Из соображений формирования необходимой площади верхнего пояски эквивалентного бруса приходится принимать продольную систему набора для верхней, наиболее удаленной от нейтральной оси, а значит, и наиболее нагруженной палубы при большой ширине

² Листы больших толщин более склонны к крутым трещинам.

³ VLCC - Very Large Crude Carrier - суда-мамонты; ULCC - Ultra Large Crude Carrier - суда-монстры.

⁴ Желательно - серьезная тема для исследования.

палуб b_s современных судов (так называемые суда с большим раскрытием палубы), когда фактическая ширина листов настала палубы $\sum b = B - b_s$ составляет не более $(0,25-0,30)B$.

Палубы, для участия которых в восприятии усилий от общего изгиба незначительны (нижние палубы, палуба баша) и которые обычно проектируются из условий обеспечения местной прочности, выполняются чаще всего по поперечной системе набора.

В поперечных сечениях листов перекрытия, участвующего в общем изгибе, возникают напряжения $\pm\sigma_0$ (рис.7). Под действием поперечной нагрузки q (давление воды на днищевое перекрытие, давление вытесняющейся воды на палубу и т.д.) в этих же сечениях возникают напряжения σ_M - местные напряжения от изгиба листов. Значения этих напряжений (рис.8) для жестких пластин, гнувшихся по цилиндрической поверхности, равны:¹

$$\sigma_M = \frac{6M}{s^2},$$

где $M_1 = k_1 qa^2$ - изгибающий момент по середине коротких кромок пластины; $M_2 = k_2 qa^2$ - изгибающий момент по середине длинных кромок; s - толщина листа (пластины).

При $a/b = 1$ $k_1 = k_2 = 0,0517$. По мере увеличения отношения a/b значение k_1 почти не меняется, а k_2 постепенно растет. Уже при $a/b \geq 1,5$ k_1 приобретает постоянное значение ($k_1 = 0,0515$), а k_2 становится постоянным и равным 0,083 при $a/b \geq 2,0$. Таким образом, напряжения от местного изгиба в сечениях на длинных кромках пластины в 1,6 раза больше напряжений в сечениях на коротких кромках.

¹ Подробно изучается в курсе строительной механики. Здесь для простоты рассуждений не рассматривается наличие напряжений в сечениях пластины от изгиба перекрытия в целом и от изгиба баша набора (изгиб пластины как присоединяемого пояса).

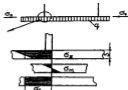


Рис.7. Суммарные обших (от общего изгиба судна) и местные напряжения в сечениях пластин

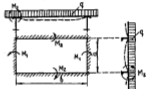


Рис.8. Изгибающие моменты в пластине, подверженной действию поперечной нагрузки

Иными словами, при ориентировке панелей (пластин) перекрытия полера судна, то есть при поперечной системе набора, суммарные напряжения $\sigma_{\Sigma} = \sigma_0 + \sigma_M$ будут несколько выше, чем они были бы (при прочих равных условиях) в случае применения продольной системы набора перекрытия.

При выборе системы набора перекрытия, подверженных действию сжимающих усилий (например, для танкеров $M_{TB} < 0$ и расчетным является суммарный прогибающий момент - палуба при об-



ном изгибе судна сжат), приходится учитывать способность перекрытой воспринимать эти усилия без потери формы, то есть приходится обеспечивать устойчивость пластин¹ перекрытий.

Из курса строительной механики известно, что эйлеровы напряжения пластин, сжатых вдоль длинных сторон, значительно больше, чем эйлеровы напряжения тех же пластин, сжатых вдоль коротких сторон. В общем случае при сжатии пластины вдоль стороны a

$$\sigma_{\text{э}} = K 200 \left(\frac{100S}{a} \right)^2,$$

где K - численный коэффициент, зависящий от соотношения сторон пластины a/b и числа полуволн, на которые разбивается пластина при потере устойчивости.

Если $\frac{a}{b} \leq \sqrt{12}$, то $K = \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right)^2$, а если $\frac{a}{b} \geq \sqrt{12}$, то

$$K = 4 \frac{a^2}{b^2}.$$

Эйлеровы напряжения - величина теоретическая. Формулы для их определения получены без учета влияния соседних участков пластины, без учета кручения балок набора - все эти факторы повышают устойчивость. Формулы для $\sigma_{\text{э}}$ не учитывают и влияния у реальных пластин так называемой начальной погрешности (V см. на рис.9). Такая погрешность, в основном, является следствием действия сил, возникающих при остывании металла сварного шва. Наличие погрешности не снижает, а наоборот, даже увеличивает устойчивость пластин, если сжимающие усилия направлены вдоль образующих (вдоль длинных сторон пластин), как это бывает при продольной системе набора.

¹ Мы акцентуируем внимание на устойчивости пластин в связи с выбором системы набора. Разумеется, надо обеспечить и устойчивость σ , продольных балок, и тем называемую критическую жесткость $I_{\text{крит}}$ поперечного набора.

Наличие погрешности снижает действительную способность пластины воспринимать сжимающие усилия, если они направлены поперек пластины и приводит к возникновению дополнительных изгибающих моментов за счет эксцентриситета. Замечено, что в некоторых случаях (корпуса легких военных кораблей, легкие корпуса подводных лодок) начальная погрешность пластин с течением времени увеличивается за счет максимума пластической деформации при возможных колебаниях в процессе эксплуатации высоких фибровых напряжений в пластинках.

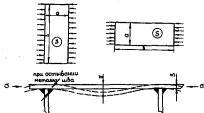


Рис.9 К определению эйлеровых напряжений пластины

Таким образом, для обеспечения высокой устойчивости пластин перекрытой набор надо полагать по направлению действия сжимающих сил. Этому требованию, при необходимости обеспечивать высокую устойчивость сжатых при общем изгибе судна пластин, отмечает продольная система набора. Иногда, по условиям эксплуатации, может быть поставлено требование - обеспечить устойчивость листов до предела текучести материала. Известно, что с учетом работы материала за пределом пропорциональности с поправкой на отступление кривой "деформация - напряжение" от закона Гука, этому условию соответствует доведение $\sigma_{\text{э}}$ до $(2,5-3,0) \sigma_{\text{т}}$. Такое

высокое значение σ , может быть практически обеспечено только при продольной системе набора.

Продольная система набора, обеспечивая участие балок в восприятии усилий от общего изгиба и высокую устойчивость подкрепляемых пластин, обладает большим недостатком: она сложнее, а значит, дороже в производстве из-за обилия пересечений продольных балок поперечными связями (рамные бимсы, рамные шпангоуты и стойки, флоры) и из-за увеличения количества соединений балок с опорным контуром.

Покажем это на простом примере. Пусть два перекрытия с соотношением сторон опорного контура l и b (рис. 10) при одинаковой площади a выполнены: одно - по продольной системе, другое - по поперечной.

Тогда количество соединений (пересечений) балок набора друг с другом:

при поперечной системе	при продольной системе
0	$\left(\frac{l}{ka} - 1\right)\left(\frac{b}{a} - 1\right)$.

количество соединений балок набора с опорным контуром:

при поперечной системе	при продольной системе
$2\left(\frac{l}{a} - 1\right)$	$2\left(\frac{l}{ka} - 1\right) + 2\left(\frac{b}{a} - 1\right)$.

Отношение количества соединений балок друг с другом и с опорным контуром при продольной системе набора $N_{пр}$ к количеству соединений при поперечной системе набора $N_{попер}$

$$\frac{N_{пр}}{N_{попер}} = \frac{\left(\frac{l}{ka} - 1\right) + \left(\frac{b}{a} - 1\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{l}{ka} - 1\right)\left(\frac{b}{a} - 1\right)}{\left(\frac{l}{a} - 1\right)}$$

Задаваясь рядом значений $\frac{l}{a}$, $\frac{b}{a}$ и k , мы сможем приблизительно

оценить относительную технологическую сложность продольной системы набора по сравнению с поперечной системой. Конечно, такая оценка довольно условна: она исходит только из сопоставления количества соединений без учета различия в трудоемкости выполнения различных видов соединений (балок с опорным контуром, балок между собой). Заметим, что особенно большую технологическую трудность вызывает выполнение узлов пересечения продольных балок с поперечными водонепроницаемыми конструкциями (водонепроницаемые флоры, переборки). В этом вы будете достаточно часто убеждаться при изучении 2-й части курса. Такие узлы являются наиболее ответственными и требуют особо тщательного выполнения.

Однако даже такое простое сопоставление показывает, что продольная система набора в тех случаях, когда она реально применяется, то есть при соотношениях сторон опорного контура около 1, сложнее в 1,5 раза и более по сравнению с поперечной системой набора.

По оценке А.Н. Бранского трудоемкость работ по узлам (по соединениям) составляет 10-30% от общей трудоемкости работ по перекрытию в целом. Таким образом, усложнение работ, связанное с применением продольной системы, может привести к увеличению трудоемкости на 15% и более по сравнению с трудоемкостью изготовления перекрытия, спроектированного по поперечной системе набора.

При выборе системы набора следует учитывать и требования специфических условий эксплуатации.

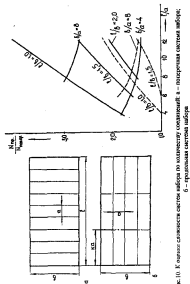


Рис. 10. К оценке сложности систем набора по количеству соединений: а - поперечная система набора; б - продольная система набора

Так, например, суда, получающие высокие ледовые классы (Л1, УЛ, УЛА), в районе ледового пояса практически всегда имеют поперечную систему набора, лучше обеспечивающую герметичность ледовой нагрузки с обшивкой на балках набора. При продольной же системе возможно приложение давления льда в промежутке между балками, ведущее к повреждению обшивки.

Предпочтительнее поперечная система и для бортов судов, швартуемых в море. К ним относятся почти все суда рыболовных судов.

Приходится принимать во внимание и то обстоятельство, что при продольной системе набора рамные связи перекрытия загораживают грузовые и жилые помещения больше, чем набор при поперечной системе. Эмпиреозначка на рис. 11 площадь характеризует потерю объема помещений. Чтобы эта потеря не превышала разумных пределов, приходится, в частности, ограничивать расстояние между рамными связями. Обычно расстояние составляет 2-4 шпации, то есть лежит в пределах 2,5-3,0 метров.

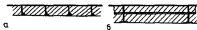


Рис. 11. Загромождение помещений балками набора: а - при поперечной системе; б - при продольной системе

Рассмотренные характеристики продольной и поперечной систем набора позволяют оценить условия и целесообразность их применения в каждом конкретном случае. Окончательный выбор системы набора перекрытия производится после рассмотрения всей совокупности факторов (рис. 12). При этом определенную помощь могли бы оказать методы оптимального проектирования конструкций.



Рис. 12. Факторы, определяющие выбор системы набора

1.3. Рекомендации по выбору системы набора

К сожалению, та славная часть человечества, которая посвятила себя судостроению (и, в частности, проектированию судовых конструкций), не решила еще красивой задачи многокритериальной оптимизации, которая позволила бы аналитически строго учесть все внешние факторы, определяющие выбор системы набора, вычислить основные, оценить изменение критериев (масса, трудоемкости, стоимости и др.) и получить зоны целесообразного, доставляющего минимум критерия оптимизации (или доступные значения критериев).

Задача эта достаточно сложна, и не столько в плане построения математической модели, сколько в плане формулирования аналитических зависимостей эксплуатационных и технологических ограничений. Первую часть задачи могли бы решить выпускники специальности 010100 - «Прикладная математика», но они недостаточно знают вторую часть; инженеры-конструкторы специальности 1401 более-менее (при желании) достаточно ориентируются в вопросах второй части, но совершенно не владеют методами оптимального

проектирования конструкций. Увы, из этих методов не учат да, пока, и не собираются.

Пока же воспользуемся хорошей инженерной практикой. Этот термин я считаю родственным известному каждому моряку (и судостроителю) понятию «хорошая морская практика».



Проиллюстрируем подход к выбору системы набора перекрытий некоторыми примерами. Рассмотрим два судовых судна с характеристиками:

Судно А	Судно Б
L = 80,0 м	L = 180,0 м
B = 12,0 м	B = 24,0 м
D = 6,5 м	D = 13,0 м
переборки - 6	переборки - 9
шпунги - 1	шпунги - 3
	высота тимберов - 3,0 м

На схемах рис. 13 показана последовательность выбора системы набора для отдельных перекрытий.

Соотношение сторон опорного контура для перекрытия судна А: все перекрытия, вытнутые вдоль судна, естественно, требуют поперечной системы набора. Бинсы, шпангоуты и флоры образуют замкнутые рамки (их называют шпангоутные рамки), все элементы которых взаимно опираются друг на друга: бинсы - на шпангоуты, шпангоуты - на бинсы и флоры, флоры - на шпангоуты.

Судно А

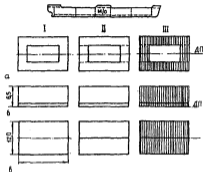
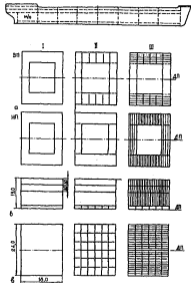


Рис. 13. К вопросу о выборе системы набора перекрытий: а - перекрытие палубы; б - бортовое перекрытие; в - декинское перекрытие; I - общий контур перекрытия; II - расположение основных поперечных связей; III - расположение связей главного направления

Судно Б



Рекомендации по выбору систем набора перекрытий корпуса в средней части судна

Тип перекрытия	Тип судна	
	Универсальное сухогрузное	Нефтеналивное
Днищевое	Поперечная, L ≤ 100 м Продольная, L > 100 м	Продольная
Бортовое	Поперечная	Поперечная, L ≤ 100 м Продольная, L > 100 м
Верхняя палуба	Поперечная, L ≤ 100 м Продольная, L > 100 м	Продольная
Нижняя палуба	Поперечная	-
Продольные переборки	Поперечная	Поперечная, L ≤ 100 м Продольная, L > 100 м Гофрированные с горизонтальной ориентацией гофра
Поперечные переборки	С вертикальными стойками	С вертикальными стойками и горизонтальными рамками - шельфами; гофрированные с горизонтальной ориентацией гофра

При рассмотрении конструкций отдельных перекрытий во 2-й части курса к обоснованию выбора системы набора мы еще будем возвращаться.

Здесь же я все-таки приведу извлечения из дипломной работы А. Джек, отлаживавшегося еще в 1974 году (или подпадавшего на мои уши: я тогда читал лекции у студентов-инженеров) сделать попытку систематического исследования изменения массы палуб-

Для судна Б систему набора перекрытия верхней палубы, казалось бы, следовало принять также поперечной: участок перекрытия между бортом и доком вытнут в продольном направлении, и кратчайшим расстоянием (наименьшим пролетом балок набора) было бы расстояние между продольными связями. Однако необходимость обеспечения требуемой из условий общей прочности площади верхнего пояса эквивалентного бруса привела бы при поперечной системе набора к очень большим толщинам (в рассматриваемом случае 30-35 мм), что не технологично (усложняется сварка) и повышает вероятность появления крупных трещин. Ставится целесообразным формирование части этой площади за счет площади сечения балок продольного набора.

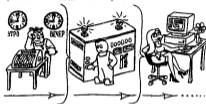
Степень участия нижней палубы в восприятии внешнего изгибающего момента, как известно, невелика, находится она близко к нейтральной оси всего сечения эквивалентного бруса и испытывает небольшие напряжения от общего изгиба. Прогибываемые, в основном, на восприятии поперечных усилий (палубный груз) такие перекрытия целесообразно выполнять по поперечной системе набора, исходя из соотношения сторон опорного контура.

Бортовое перекрытие сухогрузных судов ориентировано длинной стороной вдоль судна. Нижние палубы, являясь промежуточными жесткими опорами для шпангоутов, еще больше приспособляются к опорный контур для поперечной системы набора.

Для днищевое перекрытия судна Б целесообразна продольная система набора, исходя из соотношения сторон опорного контура, для обеспечения возможности включить площадь сечения продольных днищевых балок в эквивалентный брус и для обеспечения устойчивости днищевой обшивки (перегибающий момент у сухогрузных судов с машинным отделением в корме конструируется с прогибанием).

Далее сформулированы практически рекомендации. В табл. 1, заимствованной из учебного пособия В.Н. Траскина [4], также рекомендации представлены.

ных и днищных перекрытий сухогрузных судов в рамках требований Правил Регистра СССР. При этом использовались возможности автоматизации расчетов с помощью ЭВМ "Найри-2" - для студентов сегодняшнего дня это такой же аркан, как для тех студентов-математиков "жукне" расковы о моих расчетах системы из 12 уравнений с двадцатью неизвестными на арифмометре "Феликс" при подготовке кандидатской диссертации...



На рис.14 и 15 показаны притянутые схемы набора палубного и днищного перекрытий.

Масса палубного и днищного перекрытий C_{np} складывается из массы отдельных составляющих:

$$C_{np} = \sum G_i,$$

где (см. рис. 14) для палубы: G_1 - масса комингсов-карлингов 1, картингов в ДП 2, бимсов и полубимсов 3, концевых бимсов 4, бимсов межпалубных перемишек 5, рамных полубимсов 6, продольных подпалубных балок 7, настила палубы между бортом и линией больших вырезов, настила палубы внутри линий больших вырезов. На рис. 15 для днища обозначено: G_1 - масса вертикального кила 1, стрингеров 2, сплошных флоров 3, облегченных флоров 4, ребер же-

сткости сплошных флоров 5, ребер жесткости облегченных флоров 6, ребер жесткости вертикального кила 7, брамт у вертикального кила 8, брамт у скутового листа 9, продольных балок днища и внутреннего дна 10, обшивки днища, настила внутреннего дна.

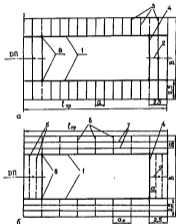


Рис.14. Схема палубного перекрытия: а - поперечная система набора; б - продольная система набора; а - шпангоут набора; L_{np} - длина трюма; B - ширина судна; a_p - расстояние между рамными бимсами; 8 - паллеры (остальные цифровые обозначения см. в тексте).

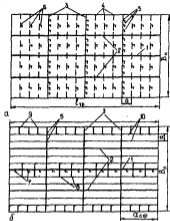


Рис. 15. Схема днищевых переборок: а – поперечная система набора; б – продольная система набора; с – толщина набора; $L_{тр}$ – длина трюма; a_n – ширина настила внутреннего дна; a_n – расстояние между сплошными флорами

На рис. 16-19 показаны некоторые результаты исследования изменения отдельных параметров при выборе системы набора по критерию массы палубного и днищевых переборок судогрузного судна.

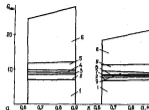


Рис. 16. Изменение составных частей массы палубного переборки: а – поперечная система набора; б – продольная система набора; 1 – комплект кордезитов; 2 – концевые балки; 3 – балки; 4 – полубалки; 5 – межпалубный настил; 6 – палубный настил; 7 – рамные полубалки; 8 – балки межпалубного участка; 9 – подпалубные балки

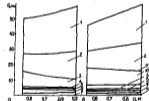


Рис. 17. Изменение составных частей массы днищевых переборок: а – поперечная система набора; б – продольная система набора; 1 – декизная обшивка; 2 – настил внутреннего дна; 3 – обогатченные флоры; 4 – реборда обогатченного флора; 5 – вертикальный киль; 6 – сплошные флоры; 7 – стрингеры; 8 – брекеты у осевого листа; 9 – продольная балка дна и внутреннего дна; 10 – реборда жесткости вертикального кила

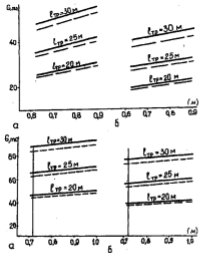


Рис. 18. Изменение массы палубного перекрытия: а – поперечная система набора; б – продольная система набора

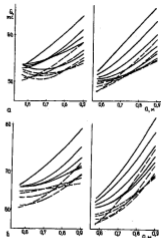
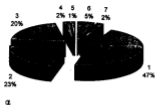
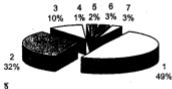


Рис. 19. Изменение массы днищевого перекрытия: а – поперечная система набора; б – продольная система набора

На рис.20 для большей наглядности представлены круговые диаграммы удельных значений G_j отдельных конструктивных элементов днищевых перекрытий сухогрузных судов.



4



5

Рис.20. Удельные значения массы отдельных конструктивных элементов в общей массе данного перекрытия (пример по рис.17,а): а - ширина 600 мм, б - ширина 900 мм

Естественно, используя богатый выбор «Мастера диаграмм» программы Microsoft Excel, каждый из нас, уважаемые коллеги, может построить также же ман любые другие, какие пожелает, из предлагаемого набора.

Когда мы делали эту работу¹, ставили задачу показать принципиальную возможность создания графиков, дающих возможность проектиранту предварительно ориентироваться при выборе системы набора и возможных изменениях составляющих массы перекрытий.

За прошедшие с 1974 г. четверть века человечество «пересело» с «Навиг» на PC Pentium, А.Джей давно уехал в Америку, а задача многокритериальной оптимизации выбора системы набора так и не решена.

Кому нужна тема кандидатской диссертации - пожалуйста. Начать ее делать можно и с 3-го курса!

Подводя итог сказанному в этой главе, еще раз подчеркну, что фактически мы ограничились рассмотренным схем, которые условно можно отнести к «классическим», т.е. чрезвычайно широко распространенным, применяемым для всех типов судов и кораблей.

Пройдяшиеся в 80-90-е годы осмысление необходимости поиска более технологичных конструкций корпусов и систем набора.

Неустанный поиск проектировщиками-судостроителями новых, более технологичных конструктивных решений привел в середине 80-х годов к появлению схемы набора без рамных поперечных связей: без флоров, рамных апангаутов и рамных бакеов. Эта экстраординарная конструкция была использована применительно к корпусу фрегата УРО «Oliver H.Perry» ВМС США.² Отмечается снижение трудоёмкости постройки корабля на 7-9% за счет корпусных работ и монтажа судовых систем и электроснабелей в блоках средней части корабля при увеличении массы средней части корпуса до 7%. Общий экономический эффект - порядка 5 % от полной стоимости корабля.

¹ Работа выполнена в 1974 г. и опубликована в Труды ЛКИ в 1975 г., вып.98.

² Самостоятельно можно ознакомиться по обстоятельной статье Родоскина А.Н. «Вспарываи конструкции для одних из возможных путей повышения технологичности корпуса корабля»/Судостроение за рубежом, 1988. N 8. С.20-25.

Противоосторожный (а вдруг это очередная попытка американизации направить нас в технологический тупик?) интерес к появлению безрамной схемы набора, на кафедре конструкции судов ЛКИ исследовали¹ влияние сокращения количества элементов двойного перекрытия (на примере донцевого перекрытия строящихся на одной из верфей Ленинграда кораблей ближнего класса) на изменение относительной массы и трудоемкости. На рис.21 показано, что в отдельных случаях целесообразно идти на сокращение количества балок основного набора (флоров и донцевых продольных балок или стрингеров) даже при некотором увеличении массы конструкций.

В транспортном судостроении применение безрамной конструкции рассмотрено японской компанией Hitachi Zosen для судопродуктовогов дедвейтом 40-80 тыс. т.

Аналогичные проработки выполнены в ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова на примере танкера.

Виды существующих систем набора и их структуры представлены на рис.22, а подробное знакомство с такими конструкциями, как гофрированные перекрытия (гофры выполняют не только функцию обшивки, но и играют роль балок главного направления) или конструкциями, где существенно уменьшено количество рымавых перекрестных связей либо их нет вовсе, - нам предстоит в других разделах курса.

¹ Работа выполнялась в рамках кандидатской диссертации аспирантом А. Скубой.

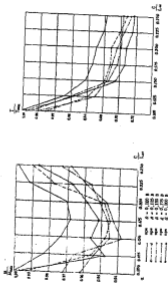


Рис.21. Зависимость массы (M) и трудоемкости изготовления (L) донцевого перекрытия от расстояния между стрингерами. C - расстояние между стрингерами, L₀₁ - расстояние между перекрестными ребрами

Открытые... обшивки механизмов в общем и частном составляют основную задачу проектирования.

Д.М.Медведева

2.1. Шпация как основополагающий элемент судовой конструкции

Большинство судостроителей твердо убеждены, что шпация - термин исключительно судостроительный. Однако это не так: шпация можно встретить в полиграфии, в переплетном деле.

Шпация (лат. spatium, англ. Space) - пространство, промежуток. В судостроении используются понятия:

шпация теоретическая, принимаемая при построении теоретического чертежа и различных расчетов, выполняемых на его базе: расчеты по теории корабля, по прочности корабля - построение элюар перерезывающих сил и изгибающих моментов от общего изгиба корпуса и т. д. Теоретическая шпация обычно принимается равной 1/20 длины судна;

шпация конструктивная - расстояние между теоретическими осями балок или листов набора корпуса судна.

Шпация **а**, т.е. расстояние между элементами набора перекрытия, занимает совершенно особое положение в общей системе проектирования корпуса судна.

Шпация является наиболее общим элементом почти всех корпусных конструкций (рис.21), от величины шпаций зависят расчетные размеры почти всех продольных и поперечных связей корпуса: толщина наружной обшивки, настила палуб, обшивки переборок. Размеры большинства балок набора корпуса определяются из условий местного изгиба. Шпация является неизменным членом всех формул для определения момента сопротивления балок вида $W = kga^2$.

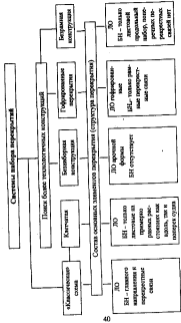


Рис. 21. Виды системы набора перекрытия в их структуре. ЛД - листы обшивки; БН - балки набора

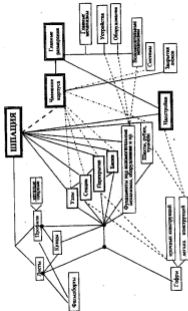


Рис. 23. ИПАЦИИ в структуре элементов судна и судовой корпус

Входит иПАЦИИ и во все формулы устойчивости плавания в балке. Уже многие годы так называемые минимальные толщины в Правилх судна не только с длиной судна, но и со иПАЦИИ.

Спираль проектирования (на рис.24 показана спираль проектирования эквивалентного бруса минимальной массы), иллюстрирующая итерационный процесс приближения к точному решению, после введения исходных данных НАЧИНАЕТСЯ С ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИПАЦИИ, которая может уточняться на каждом шаге.

Со иПАЦИИ связана компоновка помещений, установка оборудования, машины, систем и др.

В таких технологических операциях, как разметка, проверка и других, иПАЦИИ рассматривается как исходная база.

Поперечная иПАЦИИ металлических судов ранней постройки заимствована из Правил для деревянных судов, что нашло отражение в первых Правилх постройки железных судов, составленных Комитетом Английского Ллойда в 1854 г. По традиции деревянного судостроения иПАЦИИ принималась милой - 16 дюймов (407 мм). В 1857 г. иПАЦИИ увеличили до 18 дюймов с одновременным увеличением толщины наружной обшивки. В 1860 г. на первом заседании английского Королевского Института корабельных инженеров (RINA) Правила Ллойда подверглись серьезной критике за излишний вес корпуса, слишком частое расположение иПАЦИИ, распространение набора средней части на оконечности судна и др.

На отдельных этапах иПАЦИИ зависела в зависимости от вместимости судна (до 1870 г.), в зависимости от так называемой поперечной характеристики судна - $H \times B$ (до 1922 г.), в зависимости только от высоты борта H^1 (до 1965 г.), в зависимости от длины судна L - вплоть до полной отмены регламентации иПАЦИИ в средней

¹ Вероятно, студентам известно (хотя бы из курса "Общее устройство судна"), что в литературе существует некоторая путаница в обозначениях площади плавания. Ориентируясь на невеликий опыт применения $H \cdot H_{0.5}$ и $T \cdot T_{0.5}$, а ориентируясь на английский, соответственно, $D \cdot d$ и $d \cdot d$. Если хорошо, что первые буквы в словах Large и length, Breite и bread - совпадают.

части судна кроме максимальной величины $S_{max} = 1000$ мм, начиная с 1966 г. Прошли годы, и Английский Ллойд вернулся к нормированию шпации.

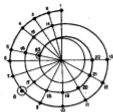


Рис.24. Последовательность проектирования корпуса судна максимальной массы (в обработке В.М.Лазарева): 1 – тип судна, главные размеры, схема поперечного сечения корпуса; 2 – изгибающий момент на талой воде по расчетной нагрузке на мидель $M_{тв max}$ по Правилам; 3 – возможные изгибающие моменты по Правилам; 4 – допустимые напряжения при обшивке борта; 5 – возможные моменты по Правилам; 6 – требуемые моменты сопротивления палубы и донца $W_{пал}$ и $W_{дон}$ по Правилам с учетом W_{max} ; 7 – выбор материала элементов корпуса; 8 – расчетные нагрузки $W_{пал}$; 9 – выбор системы набора и размера шпаций обшивки корпуса; 10 – определение толщины донца и бортовой обшивки с учетом S_{max} и условий устойчивости; 11 – определение размеров продольных балок верхней и/или нижней палубы, в том числе вертикального кема, донными стрингерами, карпачубы и донца, в том числе обшивки продольных переборок, если они есть, и размеров продольных балок этих переборок; 12 – расчет минимального бруса в первом приближении; 13 – изгибающий момент на талой воде $M_{тв max}$ по формулам Правил; 14 – возможные напряжения при обшивке борта; 15 – возможные моменты по Правилам; 16 – требуемые моменты сопротивления палубы и донца $W_{пал}$ и $W_{дон}$, если $M_{тв}$ во втором приближении удалось уменьшить; 17 – уточнение размера шпаций – при необходимости; 18-21 – уточнение размеров конструктивных элементов (табл.9-13 – в случае изменения размера шпаций; 22 – корректировка $W_{пал}$ и $W_{дон}$; 23 – минимальный момент сопротивления элементов W_{max} .

К 1913 г. относятся первые попытки теоретического обоснования применявшихся шпаций.

Британский комитет по грузовой морю предложил линейную зависимость шпации от длины судна в виде

$$S_{max} = 0,025L + 17, \text{ дюймы (L - в футах)},$$

$$\text{или } S_{max} = 0,08L + 432, \text{ мм (L - в метрах)}.$$

Правила постройки судов классификационных организаций длительное время сохраняли линейную зависимость от длины судна и рекомендовали размер шпации ¹ в виде

$$a = \alpha + \beta L. \quad (1)$$

Так, в Правилах Морского Регистра Судостроения РФ 1999 г. (Часть II. КОРПУС, раздел 1. Принципы проектирования, п.1.1.3. Определения и пояснения) записано:

¹ Шпация - расстояние между балками основного набора, принимаемое исходя из величины нормальной шпации a_n (м), определяемой по формуле

$$a_n = 0,002L + 0,48. \quad (2)$$

Отклонение от нормальной шпации может быть допущено в следующих пределах: для судов неограниченного района плавания и ограниченного района плавания I – от 0,75 a_n до 1,25 a_n ; для судов ограниченного района плавания II и III СП от 0,7 a_n до 1,25 a_n ; для судов ограниченного района плавания III и III СП от 0,65 a_n до 1,25 a_n .

В формуле и интерпретации шпация должна быть не более 0,6 м, между переборками формула и сечением 0,2L в корму от носового перпендикуляра - не более 0,7 м. Отклонение от указанных шпаций является предметом специального рассмотрения Регистром.

¹ В Правилах Регистра СССР такая шпация не очень удачно была названа нормальной. К сожалению, в издании в 1999 г. Правил Российского Морского Регистра Судостроения (так теперь, после раздела СССР выдвинулся Регистр) это неудачное название сохранилось. Будем называть ее регистровой шпацией.

Во всех случаях шагшица основного набора не должна превышать 1 м.⁷

Коэффициенты α и β были различны в отдельных Правилах постройки, однако разница между экстремальными значениями шагшицы не превышала 10%.

Требования Правил основных классификационных организаций по состоянию на 1996 - 1997 гг. представлены в табл. 2.

Таблица 2

Шагшица по требованиям Правил

Правила	Условия	Величина
Germanischer Lloyd Det Norske Veritas Bureau Veritas	L < 65 L > 65	Требований нет Требований нет $\alpha = 0,0021L + 0,48$ $\alpha = 0,72 \cdot (L/100)^{0,8}$
Lloyd Register of Shipping	При определении расчетной толщины настила в обшивке: - в средней части - вне средней части: нормальная оконечность: от нос. перр. до 0,05 L 0,05 L + 0,2 L 0,2 L + 0,25 L нормальная оконечность: от перр. перр. до 0,05 L 0,05 L + 0,15 L	$\alpha = 470 + L/0,6$ или 700 что меньше 470 + L / 0,6 или 600 470 + L / 0,6 или 700 510 + L ₀ / 0,6 при L ₀ < 215 L ₀ = L ₁₁ 470 + L / 0,6 или 600 470 + L / 0,6 или 350
American Bureau of Shipping	L ≤ 270 475 < L < 270	$\alpha = 2,08 L + 478$ $\alpha = 1000$

2.2. Влияние шагшицы на основные показатели технологичности конструкций

Вспомним, что среди многочисленных показателей технологичности¹ основными могут быть названы m - масса конструкции, T - трудоемкость и C - стоимость ее изготовления.

Существование рекомендуемой Правилами формулы (1) свидетельствует о том, что шагшица является индивидуальной характеристикой судна. Ряд исследований, в частности работы кафедры конструкции судов Ленинградского кораблестроительного института, начиная с докторской диссертации проф. Н.Е. Путова (1949 г.), показали, что регистровая формула (2) дает с практически возможной точностью величину поперечной шагшицы, близкую для судов длиной до 180 м к оптимальной, отвечающей минимальной массе перекрытия, если сами суда построены при обеспечении R'_{min} (значение момента сопротивления эквивалентного бруса соответствует минимальному значению, требуемому Правилами).

Вместе с тем, довольно многочисленные исследования, проведенные в разных странах, показывают на одно чрезвычайно важное обстоятельство: хотя для каждого данного перекрытия можно определить α_{opt} , соответствующую минимуму массы, эта масса сравнительно мало меняется даже при значительном отклонении фактической шагшицы от значения α_{opt} .

На рис.25 видна эта особенность: вблизи минимума массы m_{min} кривая, характеризующая полную массу перекрытия (листы и набор), изменяется чрезвычайно монотонно: отклонение шагшицы на $\pm 10-15\%$ от α_{opt} приводит к увеличению массы перекрытия только на 1-3%.

¹ Господ студентов приятно вспомнить, что это также - "технологичность".

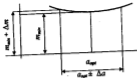


Рис.25. Характер изменения массы перекрытия в зависимости от изменения шага

Имеется довольно много работ, где это положение исследуется для отдельных перекрытий.

Весьма обстоятельное исследование изменения массы корпуса в целом (на единицу длины) при различных отношениях B/D , L/D и т.д. в зависимости от изменения шага, выполненное на основе Правил Американского Бюро судоходства, показывает сохранение подобных закономерностей (рис.26).¹

На рис. 27 представлены некоторые из большого семейства кривых, построенных по моей просьбе болгарским ученым З. Ставелевым на примере танкера средних размеров ($L=165$ м, $LH=12$, $L/B=6,25$ и $\delta=0,80$) и при $M_{max} = M_{об}$ по Правилам Морского Регистра СССР. Характер кривых практически не меняется при переходе на другую марку стали.

Все сказанное свидетельствует о том, что при выборе шага конструктор обладает известной свободой и может отклоняться как в сторону больших, по сравнению с рекомендациями Правил,² шаг, так и в сторону меньших ее значений.

¹ Вертикально изогнутые кривые содержат точки нормированных американских Правил шаг для соответствующих для судов.

² Напомним, что ряд Правил сейчас вообще не содержит рекомендаций по размерам номинальных шагов.

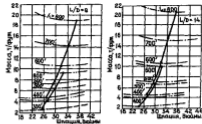


Рис.26. Изменение погошей массы корпус в зависимости от изменения шага (по J.Evans и D.Khoshy)

Кроме $a_{гр}^*$ - шага, соответствующей минимуму массы, можно ставить задачу нахождения $a_{гр}^*$ - такой шага, которая приводит к минимуму затрат при изготовлении, эксплуатации и ремонте конструкций.

Сложившись соотношение цен в ряде стран, например, как было в СССР,¹ такое, что обычно стоимость листов с увеличением их толщины увеличивается, стоимость же профилей (катаных) с увеличением их размеров - уменьшается. А чем больше шаг, тем, разумеется, при прочих равных условиях требуются большие толщины и профили.

¹ На момент написания и сдачи в печать этого настоящего пособия ничего в отечественной России про отражение этой закономерности, связанной со специфическими особенностями технологического процесса проката листов и профилей, сказать не могу...

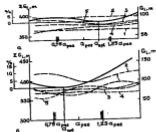
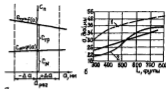
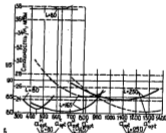


Рис.27. Изменение массы корпусных конструкций танкера $L=163$ м в зависимости от толщины (по З.Степанчу): а - изменение массы продольных переборок; б - изменение массы диаметральных и палубных перекрытий. Конструкции: 1 - палубные; 2 - диаметральные; 3 - бортовые; 4 - продольные переборки; ——— - суммарная масса отсека

Это соотношение не приводит к тому, что стоимость конструктивных материалов C_M увеличивается не прямо пропорционально увеличению массы, а значительно медленнее. Стоимость же трудовых затрат $C_{тр}$ при прочих равных условиях, максимална от количества балок, числа их концевых пересечений, с увеличением толщины уменьшается, как показывают исследования, быстрее, чем увеличивается стоимость материалов (рис.28,а).



а



б

Рис.28. Зависимость стоимости постройки корпуса судна от толщины: а - табличная зависимость составившая стоимость по В.Н.Лазареву; б - критерии для выбора размеров толщины по Л.Еванс и Д.Клоубу; 1 - изменение массы (—) и стоимости (- - - -) корпуса танкера при изменении толщины по З.Степанчу

К выводу, что экономически оптимальной является толщина, большая, чем та, которая соответствует минимуму массы конструкции, пришли и другие исследователи (см.рис.28,б). На основании

своих исследований профессор М.К. Глоzman даже смог по аналогии с (1) предложить формулы для конструкций из стали:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_s = 235 \text{ МПа} & \sigma_{\text{ср}} &= 500 + 2,5L, \\ \sigma &= \sigma_s = 294 \text{ МПа} & \sigma_{\text{ср}} &= 400 + 2,5L. \end{aligned} \quad (3)$$

По сути дела технико-экономическая задача выбора шпации может иметь разное решение в различных странах в зависимости от сложившегося соотношения цен на материалы и величины заработной платы рабочих корпусных цехов.

За 30 прошедших лет произошло большое событие: возникли новые государства и рухнула суперимперия - СССР, изменилось соотношение цен на мировом рынке, в конкурентной борьбе за заказы судовладельцев погибли крупнейшие и мощнейшие судостроительные фирмы Европы и набрали силу судостроительные фирмы Восточной и Южной Азии...

Полагаю, что опирающаяся на законы экономики - экономики Человека - формула (3) требует повторного анализа и возможной корректировки, но опирающаяся на законы физики - законы Природы формула (2) сохраняет свое значение¹.

2.3. Стандартизация шпаций

В ноябре 1964 г. совместное совещание секций стандартизации и конструкций корпуса научно-технического общества Судостроения с участием 19 судостроительных организаций отметило: "Проработки, проведенные бригадой Ленинградского кораблестроительного института (ЛКИ) с привлечением специалистов ЦКБ и судостроительных заводов, касаются весьма важного для судостроения вопроса -

создания единой основы системы взаимных утолщ параметров и размеров корпуса и корпусных конструкций... Работа ЛКИ является актуальной и ценной, поскольку в ней впервые делается попытка теоретически обосновать возможность стандартизации корпусных конструкций на основе ряда предпочтительных чисел".¹

В работе показано, что подчинение всех размеров, характеризующих корпусные конструкции (главные размерения судов, расстояние между переборками, высоты танковов - расстояния между палубами, высоты двойного дна и пр.), ряду предпочтительных чисел при наличии стандартных размеров листов, профилей и шпаций создаст предпосылки к унификации элементов и узлов корпусных конструкций и судовых переборок (см. схему на рис.23).

По договорам с Минсудпромом в 1965-1967 гг. кафедрой конструкции судов ЛКИ с привлечением сотрудников других кафедр и работников промышленности были выполнены темы по исследованию и разработке отраслевых стандартов на некоторые элементы судовых конструкций. К ним относятся в первую очередь шпации, а также составные тавровые балки и кинцы (левая верхняя часть схемы). При этом учитывалось, что материалы корпусных конструкций - листы, катаные профили, полосы и другое или уже были стандартизованы в РПЧ, или стандарты на них разрабатывались.

Если еще раз взглянуть на схему уже в плане комплексной стандартизации судостроения, то становится позитивным совершенно особое главенствующее положение в ней шпации. Скажем еще раз: анализ мировой практики, проведенный в ЛКИ по судам постройки 1950-1965 гг., показал (рис.29), что очень редко шпации выбирались в точном соответствии с рекомендациями Правил. Практика шла по пути ограничения числа применяемых размеров шпаций, отдавая

¹ Конечно, не обойтись без очередной оговорки: вид формулы сохраняется, а значения коэффициентов для других, не традиционных для судостроения конструкций, могут измениться.

¹ Ряд предпочтительных чисел (РПЧ) - принятые мировым сообществом для согласования параметров в 1953 г. по рекомендации ИСО (ISO - International Standard Organization) мультипликативные ряды чисел. Первые ряды в технике Ш. Рейнодом в 20-х годах 20-го столетия, потому знаменатель прогрессии РПЧ получил знак $R_n = \sqrt[n]{10}$, где $n = 3; 10; 20; 40$.

предпочтение некоторым значениям, большим, чем по формуле (1), и сокращая эти значения для широкого диапазона длин судов.

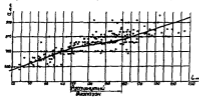


Рис.29.Шашик поперечного набора сухогрузных судов (обработка В.Н.Лазарева)

Можно видеть, что крайне редко шашики принимались точно в соответствии с рекомендациями Правил, практика выработала уже как-то "предпочтительные" шашики, и их применяли в очень широком диапазоне длин. Так, при поперечной системе набора фактически на четыре размера шашики на пятьдесятки (табл.3) приходилось 68,6%, на пять шашики продольной системы набора сухогрузных судов и на три шашики набора танкеров приходилось 57,0 и 50,0% от общего их количества соответственно.

Гистограммы распределения практических шашики приведены на рис. 30.

Кафедра конструкции судов ЛКИ выступила с идеей организационно закрепить это эмпирически сложившееся предпочтение только для некоторых значений шашики - создать СТАНДАРТ на шашики.

Предпочтительные размеры шашики

Таблица 3

Сухогрузные суда		Танкеры (продольная система набора)		
Поперечная система набора		Продольная система набора		
353 судна, 50 размеров шашики		109 судов, 28 размеров шашики		
Шашики	Процент от общего количества	Шашики	Процент от общего количества	Шашики
Область применения (по длине судов), м	Область применения (по длине судов), м	Область применения (по длине судов), м	Область применения (по длине судов), м	Область применения (по длине судов), м
600-610	6,5	48-110		
700-710	15,2	84-155	700	10,1
750-762	30,0	82-165	700-762	18,3
800	16,9	110-207	800	9,2
			850	9,2
			900	10,1
				1000
				115-200
				143-207
				152-225
				171-171
				71-157
				750-762
				800
				9
				37
				78-237
				112-225
				4
				228-255

Задача стандартизации шпаций существенно облегчается тем обстоятельством, что, хотя для каждого данного перекрытия можно определить α_{opt} , соответствующую минимуму массы или стоимости, эта масса или стоимость сравнительно мало меняются даже при значительном отклонении фактических шпаций от значения α_{opt} .

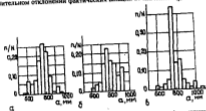


Рис.30. Гистограммы распределения шпаций (по В.Н.Лазарову): а - шпация поперечного набора корпусных судов, N=333; б - шпация продольного набора корпусных судов, N=108; в - шпация набора танков, N=100



Сравнение в оценке средних арифметических, а также дисперсионный анализ отдельных распределений шпаций поперечного и продольного набора показали, что обе статистические выборки принадлежат к одной общей (генеральной) совокупности шпаций, т.е. природа и практика выбора этих шпаций одинаковы. Следовательно, при разработке параметрического стандарта на шпации можно было исходить из общей совокупности, а не разрабатывать отдельные стандарты на расстояния между поперечными и продольными балками.

На основе методики построения параметрических рядов, анализа статистических данных применимости шпаций, на которые, учитывая довольно высокую устойчивость во времени кривых распределения дни судов, можно смотреть как на действительную потребность, были установлены градации изменения шпаций, определены их дискретные значения.

Математическая задача ставилась следующим образом. Если функция $\alpha=f(L)$ (рис.31). В рассматриваемом диапазоне длин судов, начало которого L_0 , и конец которого L_n , для каждого из выбранных длин l и m значения шпаций α_i строится кусочно-постоянная функция

$$\alpha(L) = \alpha_i \quad (4)$$

где $k=1,2,3,...,n$ при условии нахождения L в промежутке $L_{k-1} - L_k$, для которого и вводится единичная шпация α_i .

Задавая различное число n в рассматриваемом диапазоне шпаций, можно получить разные ряды. При переменной плотности распределения практических шпаций шаг рядов, как и следовало ожидать, оказался тоже переменным (табл.4).

Конструктивная проработка стандарта на шпации, предприятия как для проектирующихся и строящихся судов, так и на гипотетических судах различных размеров, показала полную практическую возможность использования шпаций по R20 даже при жестко заданных размерах и членении корпуса.

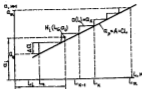


Рис.31. Графическая интерпретация задачи стандартизации шпаций

Конструктивная проработка позволила еще раз убедиться в необходимости разработки согласованных рядов главных размерений, структурного числения корпуса по длине, высоте и т.д. в РПЧ.

Таблица 4

Теоретические ряды шпаций (по В.Н.Лазареву)

Число чисел в ряду	Теоретические шпации, мм
6	360, 670, 730, 780, 850, 1000
7	360, 630, 710, 753, 800, 870, 1000

Учитывая взаимосвязь со шпациями многих определяющих параметров материалов, деталей и узлов конструкций, при разработке первого нормативного документа на шпации (1966 г.) приняли в РПЧ и страшно гордые и довольные - еще бы, индге в мире ничего подобного нет - повели в отдел стандартизации Минсудпрома на утверждение. "Говорите, в мире нет? Ну, не будем торопиться..." - сказали нам мудрые люди в Минсудпроме... Так проект стандарта стандартом не стал, а получил статус РС, т.е. документа рекомендательного, а исполнению не обязательного.

Анализ технологического процесса постройки морских судов показывает, что стандартизация шпаций дает существенный эконо-

мический эффект вследствие сокращения плазовых работ (упрощение разметки, проверки и т.д.); снижения издержек производства на изготовление и возобновление технологической оснастки; снижения трудоемкости разметки, установки набора (возможно пользование шаблонами); упрощения и сокращения различной документации; возможности применения в ряде случаев менее квалифицированного труда. Все это - так называемые факторы прямого снижения издержек производства.

Дополнительный экономический эффект от применения стандартных шпаций дает в результате действия фактора серийности - ускорение процесса освоения.

Введение норматива на шпации сыграло свою положительную роль и позволило в 1969 г., наконец, утвердить уже обязательный для исполнения документ - отраслевой стандарт на шпации (табл.5).

Права, при этом отпала от шпаций в РПЧ и приняли их округленными, кратными 100 мм (с исключением для шпации 550 мм).

В 1978 г. при очередном пересмотре стандарта не без давления проектантов было добавлено еще три значения шпаций.

Таблица 5

Размеры шпаций в соответствии с нормативными документами, мм

	Нормативный документ	Количество шпаций									
		400	500	630	710	800	900	1000			
Поперечный и продольный набор стальных судов, строящихся на заводе Регистра Соединенной ССР	РС (1966)										
	ОСТ (1969)	400	500	550	600	700	800	900	1000		
	ОСТ (1978)	400	500	550	600	700	750	800	850	900	950

Справедлив вопрос: «А как там у них, за рубежом?». А. Его часто задают и студенты на лекциях. Мне известен стандарт на шпации, принятый в судостроении Польши в 70-е годы, опыт применения постоянной шпации на ряде верфей (вспомним, что заграничей нет практики разделенных этапов проектирования и постройки между ЦКБ и судостроительным заводом - все в одном месте). Законодательно закрепленный документ - стандарт, регламентирующий ряд значений шпации в масштабах судостроения страны, при отсутствии государственного регулирования и не мог появиться.

Думаю, что если любознательным студентам, разрывающимся между обучением и заработками ради выживания, вдруг удастся найти время, было бы полезно (может даже применительно) обстоятельно познакомиться с докладом немецкого инженера, известного кораблестроителя, проектиста судов типа «Рисонса проф. К.Саллиа» «Изобретательство при проектировании судов». Доклад был сделан в 1977 г. (см.). Его основная мысль: «Изобретайте! Но помните, что среди многих принципов, которыми следует руководствоваться изобретателю, есть и такой: «Судовладельцы изобретений не любят!».

В 1704 г. от «сотворения мира» в России в Боярской думе выступил царь Петр I: "...Надобно возвать морем...Прону пародить. Время благоприятней. Фортуна саволь нас безит". Бояре почесали в бородах и поставили: "Марсины судам быть".

В честь 300-летия этого события, названного днем основания Российского Военно-Морского Флота¹, проводилась огромное количество парадов, встреч, конференций и презентаций. На одной из конференций "Стандартизация, метрология и флот" в 1996 г. я, будучи неисправным оптимистом и говоря о выборе стратегии возрождения флота российского, позволил напомнить собравшимся о

¹ Во-первых, если вы читали или читаете о литературе, что это событие происходило в 1696 году - не верно: такого года в России не было, так как указом Петра I предписывалось только день после 31 декабря 1700 года от "сотворения мира" считать 1 января 1700 года от Рождества Христова. Во-вторых, история военных морских походов насчитывает не менее тысячи лет.

роли стандартизации судовых конструкций и шпации - в первую очередь. Это, конечно, в том случае, если Россия, ее народ получит, наконец, возможность поднимать из руин российское судостроение. Не премину добавить, что в резкие плахиной экономики СССР, а то доброе для стандартизации на базе модульного принципа время относительно легко могла быть реализована координация параметров на базе ряда предпочтительных чисел и организовано производство единых общих элементов - конструктивных (КМ) и функциональных (ФМ) модулей. Не получается...

Сегодня ясно, что чисто административный подход к организации модульного формирования судовых техник, который при соответствующем понимании мог быть реализован при социализме - не пройдет. Значит, могут выиграть те фирмы, которые, вставая на ноги, поймут: в сообществе Т-систем (технические системы: пароконденсатная инфраструктура, судостроительные и судоремонтные предприятия) с большой вероятностью выживают (в экономическом смысле) те Т-системы, которые имеют в своей структуре больше общих элементов.

В декабре 1997 г. по приглашению Государственной судостроительной корпорации Китая я прочел цикл лекций по проблемам проектирования, технологий и организации модульного судостроения. И опять я говорил о стандартных шпациях как о базе для модульного судостроения. У Китая может получиться...

ЛИТЕРАТУРА

Глава I

1. Куранин А.А. Прочность корабля. Л.: Судпромгиз, 1956, 149.50.
2. Пугач Н.Е. Палубные перекрытия морских транспортных судов. Глава VIII. Системы наборы палубных перекрытий и обозначения для их выбора. Л.: Судостроение, 1966.

3. Барабанов Н.В. Конструкция корпуса морских судов. СПб.: Судостроение, 1993. Т.1. С. 52-59, 147-150.

4. Травкин В.Н. Проектирование конструктивного мидель-шпангоута морских транспортных судов: Учеб.пособие. Л.: Изд. ЛКИ, 1986.

С историей развития систем набора настоятельно рекомендую ознакомиться по книге Н.Е. Путова «Конструкция корпуса судов», глава VI «Системы набора судов». Л.: ОНТИ, 1937. С. 340 - 426, и по книге Н.Г.Бубнова «Избранные труды», глава III «Крепость судого набора». Л.: Судостроение, 1956. С.67-99.

С примерами реализации той или иной системы набора перекрытий можно ознакомиться по альбому В.Н.Лазарева и М.К.Глоzman «Конструктивные мидель-шпангоуты морских транспортных судов». Л.: Изд. ЛКИ, 1970.

К главе 2

1. Васильев А.Л. Стандартизация в судостроении. Глава 4. Шпация - основное звено стандартизации конструкции. Л.: Судостроение, 1978. С.114-128.

2. Глоzman М.К. Технологичность конструкций корпуса морских судов. Глава 3. Шпация. Л.: Судостроение, 1934. С.80-108.

3. Лазарев В.Н. Исследование возможности стандартизации шпаций морских транспортных судов: Дисс. на соиск. учён. степени канд. техн. наук. 1970.

О ряде предпочтительных чисел можно прочесть в книге А.Л.Васильева «Абсолютный принцип формирования техники», раздел «Методы взаимного согласования параметров и размеров». М.: Изд. Стандартов, 1989.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора - студентам.....	3
ГЛАВА 1. СИСТЕМЫ НАБОРА ПЕРЕКРЫТИЙ КОРПУСА	5
1.1. Назначение набора. Классификация систем набора.....	6
1.2. Факторы, влияющие на выбор системы набора.....	11
1.3. Рекомендации по выбору системы набора.....	24
ГЛАВА 2. ВЫБОР ШПАЦИИ.....	41
2.1. Шпация как основополагающий элемент судовой конструкции	41
2.2.Влияние шпации на основные показатели технологичности конструкций.....	47
2.3. Стандартизация шпаций.....	52
Литература	61

Алексей Леонадович ВАСИЛЬЕВ

ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСА СУДОВ

Научный редактор канд. техн. наук, доц. *В.Н. Пеллерс*

Редактор *Г.А.Кани*
Корректор *Н.Ф.Слушанова*

Лицензия ЛР № 020021 от 20.10.95

Подписано в печать 20.08.2000

Формат 60x90/16. Бумага писчая. Печать офсетная.

Уч.-изд. л. 3,5. Усл. печ. л. 4,0. Тир. 200. Заказ 1636.

Издательский центр Морского технического университета.

СПб., ул. Лоухманова, 10.